



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu

Ilkka Hätönen

Betonin kuivumisen varmistaminen hankkeen kosteudenhallintaprosessin osana

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 16.05.2016

Valvoja: Professori Xiaoshu Lü-Tervola

Ohjaaja: Tytti Kuusikko

Tekijä Ilkka Hätönen

Työn nimi Betonin kuivumisen varmistaminen hankkeen kosteudenhallintaprosessin osana

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

Pää Rakennusmateriaalit ja rakennusfysiikka

Koodi IA3017

Työn valvoja Xiaoshu Lü-Tervola

Työn ohjaaja(t) Tytti Kuusikko

Päivämäärä 16.05.2016

Sivumäärä 67+9

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Eduskunnan tarkastusvaliokunnan raportin mukaan Suomessa sadat tuhannet ihmiset altistuvat vuosittain rakenteiden kosteus- ja homevaurioista sekä heikentyneestä sisäilmanlaadusta seurauksena oleville terveyshaitoille. Kosteusvaurioiden aiheuttamat terveydenhuollon ja rakentamisen kulut ovat vuosittain satoja miljoonia euroja. Rakennekosteuden kuivattamisen epäonnistuminen on aiheuttajana suuressa osassa vaurioista. Tästä syystä asianmukainen rakennushankkeen kosteudenhallinta on olennaisessa osassa kosteusperäisten ongelmien ehkäisyssä. Kosteudenhallintaprosessin tulee jatkua läpi koko rakennuksen elinkaaren suunnittelusta ja rakentamisesta aina käytön ja huollon aikaiseen toimintaan saakka. Nykyaikaiset rakennusmateriaalit ja tiiveysvaatimukset korostavat kosteusperäisten virheiden vakavuutta entisestään.

Tämä diplomityö käsittelee kosteusvaurioiden ongelmakenttää tutkimalla kosteudenhallintaprosessin kulkua ja toimia, joilla vaurioriskiä voidaan pienentää jo työmaavaiheessa. Erityishuomio on suunnattu betonin rakennekosteuden kuivattamiseen. Työn tavoitteena on esitellä työkalut kosteudenhallintaprosessin läpivientiin hankkeessa sekä määrittää toimintaohje yrityksen kosteudenhallintatoimien suorittamiseen. Esitettyjä toimenpiteitä voidaan helposti muokata kuhunkin hanke- ja rakennustyyppiin sopiviksi.

Tehokas kosteudenhallinta ja rakennekosteuden kuivattaminen ovat riippuvaisia monista eri tekijöistä, kuten rakennuksen käyttötarkoituksesta, dimensioista, sijainnista, sääoloista sekä käytetyistä materiaaleista. Tämä diplomityö keskittyy toimiin, joita voidaan tehdä varsinaisen rakentamisen ja työmaatoiminnan aikana. Olennaista on estää valmistuvien rakenteiden lisäkastuminen. Tehokkain tapa on käyttää tarkoituksenmukaista sää- ja aukkосуojausta. Betonin kuivumisen kannalta olennaista on kuivumisolosuhteiden saavuttaminen: ilman lämpötila vähintään 20 °C, suhteellinen kosteus enintään 50 %. Näiden olosuhteiden saavuttamiseksi kuivatettavan tilan ilmaa tulee talvella lämmittää sekä kesä- ja syysaikaan koneellisesti kuivattaa. Globaali ilmastomuutos vaikeuttaa osaltaan olosuhteiden hallintaan säätilojen ääripäiden yleistyessä. Ennakoarvioinneista ja tarkasta olosuhdehallinnasta huolimatta kuivattamisen onnistuminen tulee aina todentaa rakenteesta ennen pinnoitustöitä tehtävillä suhteellisen kosteuden mittauksilla.

Työssä esitettyä kosteudenhallinta- ja kuivatusprosessia on tutkittu myös case-kohteena toimineella uudisrakennustyömaalla. Case-kohteessa havaittiin betonin kuivumiseen liittyvä monimutkaisuus sekä muuttujien suuri määrä. Tällöin olosuhteiden ja rakenteen kosteustilan jatkuva seuranta on tärkeää, jotta poikkeamiin voidaan reagoida nopeasti. Kaikki mittaukset on tehtävä huolellisesti, jotta ne eivät johda työmaan toimintaa harhaan. Kosteudenhallintaan ja rakennekosteuden kuivatukseen vaatimat kehitystarpeet liittyvätkin kuivumisprosessin parempaan ennakkointiin ja kosteudenhallinnan liittämiseen luonnolliseksi osaksi työmaan jokapäiväistä toimintaa.

Avainsanat kosteudenhallinta, betonin kuivuminen, rakennekosteus, kosteusvaurio

Author Ilkka Hätönen

Title of thesis Securing Drying of Concrete as a Part of Moisture Control Process

Degree programme Structural Engineering and Building Technology

Major Building Materials and Physics

Code IA3017

Thesis supervisor Xiaoshu Lü-Tervola

Thesis advisor(s) Tytti Kuusikko

Date 16.05.2016

Number of pages 67+9

Language Finnish

Abstract

The Audit Committee of the Finnish Parliament has reported that hundreds of thousands of people, a significant part of the population, have adverse health effects associated with moisture, mould and indoor air quality problems. The health and technical issues are causing economical losses as high as hundreds of millions of euros annually. Failure to properly dry out the moisture during construction phase is at least partly responsible for these health hazards and structural damages. Therefore an appropriate moisture control process is in key position when preventing these damages to happen for the whole service life of a building. This process should cover the entire existence of the building from design and construction to the final operation and maintenance. Modern building materials and impervious structures are emphasizing the significance of moisture related errors.

This master's thesis deals with this urgent issue by exploring moisture control measures and strategies needed to minimize the risk of moisture problems during construction phase. Special attention is paid to drying period of concrete structures. The aim is to represent a moisture control process and to describe an action plan that a construction company can use to successfully implement good moisture control management practices. These practices can be adapted to various types of projects.

Effective moisture control and concrete drying process depends on many factors such as purpose of use, weather, site properties, materials used and building type. There are some general guidelines but in detail the process is always site dependence. This thesis focuses on the actions that can be made on building site during construction work in Finnish weather conditions. The key is to prevent structures from getting wet after they are casted or installed. After proper weather protection is done, on-site heating and air drying actions are to be taken care of. Effective drying of concrete requires the minimum temperature of 20 °C and relative humidity less than 50 percent. To achieve proper drying conditions indoor air must be heated up during winter and dried during summer and autumn seasons. Global climate change will also increase the probability of extreme weather conditions. Drying process must be proved by conducting multiple moisture measurements from the concrete structures before the final coating is laid.

The moisture control process introduced in this thesis was partly implemented in a case study on a new construction site. Experiences gained from this thesis work demonstrated the complexity of the drying process. On-site monitoring is vital and must be closely combined with structural moisture measurements. The measurements have to be done with great care to give reliable data for site management and scheduling. In the future work this implement has to be improved.

Keywords construction moisture control, drying of concrete, construction water, water damage

Alkusanat

Työtehtäväni SRV Rakennus Oy:ssä johdattivat minut tekemään diplomityötä työmaan kosteudenhallinnasta ja betonin kuivattaminen varmistamisesta. Työ sai alkusysäyksen-
sä keväällä 2015 esimiesteni suosiollisella avustuksella. Pitkän ja paikoin tyhjäkäynnilläkin edenneen projektin tulos on näissä kansissa.

Haluan kiittää diplomityöni valvojaa professori Xiaoshu Lü-Tervolaa rakentavasta ja innostavasta palautteesta.

Diplomityöni ohjauksesta kiitän SRV Rakennus Oy:n Tytti Kuusikkoa, joka antoi ensiarvoisen tärkeitä vinkkejä ja suuntaviivoja työn laatimiseen.

Samalla kiitokset SRV:n esimiehilleni Antti Raunemaalle, Pekka Kähköselle sekä Eero Laaksolle mahdollisuudesta ja kannustuksesta työn tekemiseen. Työtovereitani kiitän niin ikään kannustuksesta sekä erityisesti hyväntahtoisesta eteenpäin tönnimisestä.

Suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin perheelleni ja ystävilleni, jotka jaksoivat uskoa ja kannustaa eteenpäin diplomityön tekemisessä.

Espoo 16.5.2016



Ilkka Hätönen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoite, rajaus ja käytetyt menetelmät	2
2	Rakentamisen kosteudenhallinnan kokonaisuus ja nykytilanne	2
2.1	Kosteus- ja homevauriot Suomessa	2
2.2	Rakennusprojektin kosteudenhallinta rakennushankkeen kokonaisuudessa	5
2.3	Kosteudenhallintaprosessin kulku	6
3	Rakennekosteuden kuivattamisen merkitys	9
3.1	Rakennekosteuden kuivattaminen osana kosteudenhallintaprosessia	9
3.2	Vauriotyyppi 1: pintamateriaalin irtoaminen ja ulkonäkövaihtelut	11
3.3	Vauriotyyppi 2: pintamateriaalin ja tasoitteiden mikrobivauriot	12
3.4	Vauriotyyppi 3: kosteuden aiheuttamat kemialliset reaktiot ja näiden emissiot	13
3.5	Päällystämisen raja-arvojen määrittäminen ja tarkkuuden merkitys	17
4	Betonissa oleva kosteus ja kuivumisprosessi	20
4.1	Kosteus betonissa	20
4.2	Betonin kuivuminen	21
5	Betonirakenteen kuivumisen arviointi ja ennakointi	23
5.1	Betonin kuivumisen ennakoarviointitapa 1	23
5.2	Betonin kuivumisen ennakoarviointitapa 2	26
5.3	Kuivumisarviointitapojen vertailu	29
6	Kuivumisen varmistaminen työmaan olosuhteiden hallinnalla	31
6.1	Olosuhteiden merkitys rakenteen kuivumisessa	31
6.2	Kuivumisolosuhteiden määrittäminen ja ylläpito	34
7	Rakenteen kosteustilan todentaminen ja pinnoitettavuuden arviointi	37
7.1	Porareikämittaus	37
7.2	Näytepalamenetelmä	39
7.3	Rakenteessa olevat kiinteät mittalaitteet	40
7.4	Kosteusmittausten epävarmuustekijöiden ja virhemarginaalin huomioiminen	40
8	Case-tutkimus	43
8.1	Kosteudenhallinnan kannalta kriittisten seikkojen tunnistaminen ja kosteudenhallintasuunnitelman laatiminen	43
8.2	Kosteudenhallinnan toteuttamisen perusperiaatteet työmaalla	46
8.3	Yksittäisten osalohkojen kuivumisolosuhteiden suunnittelu ja seuranta	50
8.4	Kuivumisen seuranta, pinnoitettavuusmittaukset sekä kosteudenhallintaraportointi ..	56
9	Tutkimustulokset ja niiden arviointi	60
9.1	Johtopäätökset	60
9.2	Jatkokehitys- ja tutkimustarpeet	61
10	Yhteenveto	62
	Lähdeluettelo	64
	Liiteluettelo	67
	Liitteet	

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakentamiseen liittyvän kosteudenhallinnan taustalla on rakennuksen terveellisuuden takaaminen. Rakennuksen ja rakenteen kosteustekninen toimivuus kuuluvatkin rakennuksen olennaisten vaatimusten joukkoon siinä missä esimerkiksi lujuus- ja paloturvallisuusvaatimukset. Kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavat osaltaan kaikki rakennushankkeen vaiheet suunnittelusta rakentamiseen sekä lopulliseen käytönaikaiseen toimintaan ja huoltoon. Kokonaisprosessi alkaa rakennuttamisen tavoitteista päättyen käyttäjän tehtäviin. Tämän kokonaisuuden hallinnan puuttuminen on koettu monissa hankkeissa laadukkaan lopputuotteen saavuttamisen suurimmaksi haasteeksi. Pahimmillaan prosessissa epäonnistuminen johtaa rakennuksen käytön aikana ilmenevään kosteus- ja homevaurioon, jonka seurauksena on sekä taloudellista että ennen kaikkea terveydellistä haittaa.

Suomessa merkittävän kosteusvaurion omaavissa rakennuksissa oleskelee päivittäin satoja tuhansia ihmisiä ja vaurioiden korjauksiin käytetään vuosittain satoja miljoonia euroja. Vaurioituneiden rakennusten kirjo on laaja kattaen likimain kaikki rakennustyyppit asunnoista ja työpaikoista kouluihin ja päiväkoteihin. Vauriot eivät tyypillisesti keskity vain yhteen rakennusmuotoon, vaan niitä havaitaan niin kerros-, pien- kuin toimitilataloissakin. Ongelman laajuudesta johtuen kosteus- ja homevauriot ovat jatkuvasti esillä niin julkisessa keskustelussa kuin erinäisissä tutkimus- ja kehityshankkeissa. Kaikki home- ja kosteusvauriot eivät ole seurausta epäonnistuneesta työmaa-aikaisesta kosteudenhallinnasta, mutta kyseisen osaproessin huolellisella suunnittelulla ja laadukkaalla toteutuksella on mahdollista varmistaa rakennuksen kosteusteknisen toimivuuden lähtökohdat elinkaaren alkuvaiheessa. Välittömästi työmaatoimintaan vaikuttavia kosteudenhallinnassa epäonnistumisen seurauksia ovat esimerkiksi aikatauluviiveet ja laatupoikkeamat sekä näistä aiheutuvat taloudelliset tappiot.(1, s.1)

Nykypäivänä rakentamista ohjaavat puhtaasti teknisten seikkojen lisäksi myös pyrkimys entistä energiatehokkaampiin ratkaisuihin ja elinkaarensa aikana ilmastoystävällisempiin rakennuksiin. Yksinkertaisten rakennukset toteutetaan tämän vaatimuksen täyttämiseksi entistä tiiviimpinä ja raskaammin lämmöneristettyinä. Monissa tapauksissa perinteiset turvallisena pidetyt toteutustavat on todettu tehottomiksi matalaenergiatavoitteiden saavuttamisen kannalta. Muuttuneet suunnittelulähtökohdat tuovat mukanaan monimutkaisempaa ja toteutusvirheille herkempää rakennedetaljiikkaa sekä uusia, pitkäaikaistoimivuudeltaan vielä epävarmoja materiaaleja. Varsinkin kasvukeskuksissa pohjaolosuhteiltaan parhaimmat alueet ovat jo täyteen rakennettuja, jolloin uutta tonttimaata joudutaan hakemaan esimerkiksi aiemmin rakentamattomilta, haasteellisilta savi- ja kosteikkoalueilta. Nämä osin ulkoiset tekijät asettavat aiempaa suuremmat haasteet rakenteiden rakennusfysikaaliselle toiminnalle.

Ilmastonmuutoksen eteneminen tuo rakentamiseen omat haasteensa, vaikka Suomessa rakentamista on aina jouduttu tekemään myös keskellä kylmintä pakkasjaksoa tai erityisen sateisessa kesäsäässä. Lisääntyvät sateet ja toistuvat, aiemmin lähinnä poikkeuksena pidetyt, säätilojen ääripäät yleistyvät ja mahdollisesti myös pitkittyvät. Yksinkertaistettuna rakentamisen uudet ratkaisut sekä ulkopuoliset tekijät vaativat aiempaa tarkempaa toteutusta ja laadunvalvontaa.(2, s. 17) Mahdollisista epävarmuuksista huolimatta uusia teknisiltä

lähtökohdiltaan aiempaa parempia toteutustapoja ja materiaaleja tulisi hyödyntää rohkeasti ja kokemusta keräten, mutta samalla perustellusti ja mahdolliset riskit tiedostaen.

1.2 Tutkimuksen tavoite, rajaus ja käytetyt menetelmät

Edellä esitettyjen lähtökohtien perusteella ryhdyttiin tätä diplomityötä varten tutkimaan rakennustyömaan kosteudenhallintaprosessia. Aiheeksi kehittyi rakennusaikaisen kosteudenhallintaprosessin suunnittelu, hallinta ja toteutumisen seuranta. Erityistarkastelussa ovat rakennustyömaan betonirakenteiden kuivattamisen tehokas suorittaminen sekä laadukas ja aikatauluviiveetön rakenteen pinnoittaminen.

Tutkimusta ohjasivat seuraavat tutkimuskysymykset: Miten määritellään rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessin sisältö ja mitkä prosessin osat ovat erityisesti työmaatoimintaa ohjaavia? Miksi rakennekosteuden poistaminen tehokkaasti on tärkeää? Miten betonirakenteiden kuivumista voidaan ennakoida työmaan tuotannonsuunnittelun ja aikataulutuksen kannalta? Millä keinoilla rakennekosteuden kuivatus voidaan suorittaa tehokkaimmin? Kuinka rakennekosteuden kuivumista voidaan seurata ja todeta päällystämisen rajakosteuden saavuttaminen?

Edellä listattuihin kysymyksiin pyrittiin löytämään vastauksia käyttämällä tutkimusmenetelminä kirjallisuustutkimusta sekä case-kohteeseen liittyvää tietoa. Kirjallisuutta on työssä käytetty paitsi olemassa olevan tilanteen määrittämiseen myös tällä hetkellä käytössä olevien kosteudenhallinnan työkalujen selvittämiseen. Työssä esitellään muun muassa kaksi menetelmää betonirakenteen kuivumisaika-arvion laatimiseksi. Tarkoituksena on esitellä keinoja, joita voidaan työmaaorganisaation toimesta käyttää suuntaa antavien arvioiden laatimiseksi tehokkaasti ja osin vajavaisilla alkutiedoilla. Kirjallisuustutkimuksen lähtökohdista on arvioitu kosteudenhallinnan ja rakenteen kuivattamisen prosessia case-kohteessa, jonka runkoratkaisu koostuu erityyppisistä paikalla valetuista sekä elementteinä valmistetuista betonirakenteista.

Työn tuloksena esitetään ratkaisuja, joiden avulla kosteudenhallinnasta voidaan työmaalla luoda hallittu prosessi selkeine toimintatapoineen. Kuivumisolosuhteiden hallinnassa lähtökohdaksi todetaan toiminnan ennakoiminen ja poikkeustilanteisiin varautuminen. Prosessikuvauksen yhteydessä tuodaan lisäksi esille betonirakenteiden kuivumiseen liittyvä monimutkaisuus ja ennakoimisen vaikeus sekä kuivumisen todentamiseen lähes aina liittyvä lähtökohtaisen epävarmuuden tiedostaminen. Samalla kuvataan case-kohteen kokemusten perusteella esimerkki rakennekosteuden työmaa-aikaisesta seurannasta, dokumentoinnista ja raportoinnista. Esitetyt pääperiaatteet ovat sovellettavissa laajasti erilaisiin hankkeisiin käyttötarkoituksesta ja laajuudesta riippumatta.

2 Rakentamisen kosteudenhallinnan kokonaisuus ja nykytilanne

2.1 Kosteus- ja homevauriot Suomessa

Kosteus- ja homevauriolla tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaalin tai rakenteen kosteudensietokyky on ylittynyt ja seurauksena on syntynyt vauriokohtaan home- ja hiivasieni ja/tai bakteerikasvustoja. (3, s. 32) Tällaiset vauriot aiheuttavat nykyisellään Suomessa merkittäviä sisäympäristöongelmia, joilla on sekä selviä terveydellisiä että taloudellisia vaikutuksia, välittöminä ja välillisinä. Kosteusvauriot ovat sinällään ilmiöinä yleisiä, sillä

niitä esiintyy aika ajoin ja lievinä lähes jokaisessa rakennuksessa vuosikymmeniä pitkän käyttöiän aikana. Rakenteen kastuminen on kriittistä silloin, kun kosteus ei pääse kuivumaan rakenteesta ajallaan. Kastuneeseen materiaaliin alkaa tällöin melko nopeasti ilmaantua mikrobeja. Yleisimmin nämä ovat home- ja hiivasieniä sekä bakteereita. Kastumisen pitkittyminen ja kuivumisen estyminen johtavat haitalliseen kosteusvaurioon. Kosteusvaurio voidaan todeta merkittäväksi ollessaan laajuudeltaan huomattava rakenteellinen vika ja erityisesti, jos sen seurauksena on altistuminen ihmiselle haitallisille aineille. Näiden kosteusvaurioiden korjaustarve on pääsääntöisesti kiireellinen, jotta altistuminen voidaan poistaa kokonaan tai sitä voidaan ainakin merkittävästi vähentää.(3, s. 63)

Kosteusvaurion seurauksena heikentyneen sisäilman mukana mikrobit kulkeutuvat ihmisen silmiin, iholle ja hengitysteihin. Tämä altistuminen voi pahimmillaan johtaa pitkäaikaiseen oireiluun ja sairastumiseen esimerkiksi astmaan tai vastaaviin hengitystietauteihin. (3, s. 12) Kosteus- ja homevaurioiden aiheuttamien terveysvaikutusten syntymekanismi ja varsinaiset oireilua aiheuttamat tekijät ovat osittain edelleen epävarmoja. Tällä saralla tutkimustyö jatkuu. Ihmisten välillä on suuria yksilöllisiä eroja heikentyneeseen sisäilmastoon reagoimisen suhteen. Erityisesti rakennuksen käyttäjäkunnan ollessa laaja tämä muodostaa haasteen vauriolähteen tunnistamisen ja kartoittamisen osalta.

Kosteusvaurioita ja niiden syitä on tutkittu laajasti rakennustekniikassa. Tehdyistä toimenpiteistä huolimatta vauriotyyppejä ei ole pystytty täysin poistamaan tai estämään ennakolta. Osaltaan tilanne on myös jatkuvasti muuttuva eivätkä vanhat toimenpiteet välttämättä toimi nykyaikaisten rakennusten, rakenneratkaisuiden ja materiaalien kohdalla. Tähän ovat osaltaan syinä energiatehokkuuden parantamiseksi tehtävät, jatkuvasti monimutkaistuvat rakenteet sekä muun muassa optimaalisten rakennuspaikkojen vähenemisen mukanaan tuomat haasteet. Kosteus- ja homevaurioiden tyypillisiksi syiksi on todettu riskejä sisältävät suunnitteluratkaisut, puutteet työmaan kosteudenhallinnassa, virheet työmaatoteutuksessa ja kunnossapidon laiminlyönnit sekä rakenteiden luonnollinen kuluminen tai vaurioituminen elinkaarensa aikana. (3, s. 11) Kaikkiin edellä mainittuihin tekijöihin voidaan vaikuttaa jo ennen varsinaista rakentamisprosessia sekä erityisesti sen aikaisilla toimenpiteillä. Tällöin kosteusvaurioriskin minimointi on helpointa ja kustannuksiltaan edullisinta. Lisäksi vähintäänkin oletetut riskirakenteet voidaan toteuttaa siten, että mahdollinen vaurio havaitaan hyvissä ajoin ennen sen etenemistä merkittävää haittaa aiheuttavalle tasolle.

Kosteuseräisiä ongelmia havaitaan kaikissa rakennustyypeissä ja käyttötarkoituksissa. Merkittävien kosteus- ja homevaurioiden esiintyvyys on arvioitu olevan pien- ja rivitaloissa 7-10 %, kerrostaloissa 6-9 %, kouluissa ja päiväkodeissa 12-18 %, hoitolaitoksissa 20-26 % ja toimistoissa 2,5-5 % kerrosalasta. (3, s. 11) Nämä luvut perustuvat Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisun koosteisiin 2000-luvulla tehdyistä tutkimuksista. Lukujen perusteella vaurioiden vaikutuspiirissä asuu tai oleskelee satoja tuhansia henkilöitä. Ongelma vaikuttaa siis merkittävään osaan väestöstä. Vähäisempien kosteusvaurioiden, jotka eivät vaaranna terveyttä tai vaadi välittömiä toimenpiteitä, määrän arvioidaan olevan tätäkin suurempi.

Kosteusvaurion määritelmä vaihtelee suuresti eri toimijoiden, erityisesti eri valtioiden välillä. Tästä syystä ilmiön yleisyyttä Suomessa on vaikeaa verrata muuhun Maailmaan. Esimerkiksi Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisussa kosteusvaurioiden yleisyyden arviot eri Euroopan maissa on ilmoitettu välille 2-85 % rakennuskannasta.(3, s. 64) Merkittävien kosteusvaurioiden osuus tästä ei ole selvillä. Myös suomalaista rakennuskantaa käsittelevissä tutkimuksissa kosteusvaurioiden yleisyyden arviot ovat vaihdelleet suuresti eri tutkimusten välillä. (3, s.64-69) Julkisten rakennusten osalta Kuntaliitto laati vuonna 2005

kyselytutkimuksen kuntien tekemistä kosteus- ja homevaurioiden korjauksista rakennuskannalleen. Kyselyyn vastanneiden kuntien osalta vuosina 2002-2004 kosteus- ja homevaurioiden korjauksia tehtiin 14240 julkisessa rakennuksessa yhteensä 26,25 miljoonalla eurolla. Kyselyn estimaattina vastaavan aikavälin korjauksille saatiin 63,74 miljoonaa euroa. Yleisimmin vaurioihin johtuneeksi syyksi arvioitiin suunnitteluvirhe, keskimäärin peräti 42 prosentissa tapauksissa. Rakennusvirheestä johtuviksi vaurioiksi arvioitiin 28 prosenttia tapauksista. (3, s. 132) Näiden lukujen valossa suurimmaksi riskitekijäksi kosteusvaurioiden syntymisessä voidaan todeta olevan suunnittelussa ja työmaalla tapahtuvat virheet ja puutteet. Selkeiden laatupuutteiden lisäksi tähän toimintaan kuuluvat myös kosteudenhallintaan liittyvissä toimenpiteissä epäonnistuminen. Kuntaliiton tutkimuksessa yleisimmin vaurioituneiksi rakennusosiksi todettiin julkisivut sekä vesikatto. Vaurion esiintymispaikat kuitenkin vaihtelivat jonkin verran rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi toimistorakennuksissa ulkoseinien vauriot olivat selvästi muita rakennustyyppejä yleisempiä. Korjauskustannusten valossa suurin yksittäinen panos on kohdennettu sisätilan korjauksiin, noin 40 % korjauskustannuksista. (3, s.132-134)

Kosteus- ja homevaurioista aiheutuvat taloudelliset vaikutukset ovat merkittäviä. Rakennusten korjauskustannuksina tämä tarkoitti esimerkiksi vuonna 2010 lähes 10 miljardin euron menoja. Terveysteen liittyvien kulujen arviointi on rakennuskustannuksia vaikeampaa monimutkaisten ja osin vaikeammin rajattavien vaikutusten takia. Arviot vaihtelevat Suomen osalta 23 ja 953 miljoonan euron vuosittaisten kustannusten välillä. Tämä kustannus sisältää oireista ja sairauksista johtuvien tutkimusten, työkyvyn menettämisen sekä työn tuottavuuden laskun aiheuttamia kustannuksia. (3, s. 13) Taloudellisten vaikutusten verrattavuus aiheutuneeseen henkilökohtaiseen haittaan ja mahdolliseen elämän laadun heikkenemiseen on huono. Monissa tapauksissa kosteus- ja homevauriolle altistuminen aiheuttaa pitkäaikaista haittaa myös henkilön perhepiirille sekä työyhteisölle. Esitettyjen terveydenhuoltoon liittyvien menojen perusteella voidaan karkeasti todeta, että vuosittainen miljardin euron kertapanostus korjausrakentamiseen olisi lähtökohtaisesti järkevä ja sitä kautta voidaan saavuttaa kansantaloudellista hyötyä. (3, s. 13) Samalla tulee vertailla korjauskustannusten ja kokonaan uuden rakennuksen tuotantokustannusten välistä eroa. Monin paikoin on järkevämpää purkaa vanha käyttöikänsä päähän tullut rakennus ja korvata se uudella. Näin on toimittu esimerkiksi joissakin 1960- ja 70-luvuilla rakennetuissa kerrostalolähiöissä sekä jopa tätä myöhemmin rakennettujen koulu- ja sairaalakiinteistöjen osalta. Luonnollisesti järkevin ja kustannustehokkain tapa on ennaltaehkäistä kosteus- ja homevaurioiden synty uusissa rakennuksissa jo rakentamis- ja suunnitteluprosessin aikana. Sama pätee korjausrakentamisprosessiin: väärällä korjaustavalla voidaan kasvattaa kosteusvaurion riskiä sen poistamisen sijasta.

Rakennekosteuden ja rakenteiden kastumisen lisäksi rakennuksessa tapahtuvat erilaiset vuodot aiheuttavat merkittävän osan kosteusvahingoista. Esimerkiksi vuonna 2014 Finanssialan keskusliiton julkaiseman Vuotovahinkoselvitys 2012-2013:n mukaan vuotovahingot aiheuttivat vuonna 2012 vakuutusyhtiöille kaikkiaan 157 miljoonan euron edestä korvattavaa. Kaikkiaan vuotovahinkoja korvattiin noin 36000 kappaletta. Selvityksen mukaan kokonaisuudessaan vuotovahingot muodostavat nykyisin vakuutusyhtiöille suurimman korvausmenon kiinteistö- ja kotivakuutusten osalta. Osaltaan vuotovahinkojen todettiin johtuneen puutteellisesta huollosta ja ylläpidosta. Tämä käytönaikainen toiminta on osa laajempaa kosteudenhallintaprosessia. Vuotovahinkoselvityksessä merkittävimpänä vahinkelähteenä todettiin olevan talotekniset järjestelmät, erityisesti putki- ja vesikalusterikot. Oman osansa vuodoista aiheutti kuitenkin myös erityiset rakennustekniset kokonaisuudet, kuten vesikaton rakenteet. Voidaan todeta, että tältäkin kannalta tarkasteltuna rakennus- ja taloteknisten järjestelmien toteutus ja suunnittelu tulee olla jatkuvassa yhteydessä toisiinsa.

Selvityksessä tarkastelluista tapauksista noin kymmenesosa on johtunut selvästä rakennus- tai huoltovirheestä. Näissä tapauksissa tehdyt korvaushakemukset on vakuutusyhtiön osalta yleensä hylätty. Vuodoista johtuvien vauriotapausten suhteellinen osuus on pysynyt likimain samalla tasolla aiempiin vuosina 2002-2003 sekä 2007-2008 tehtyihin vuotovahinkoselvityksiin nähden. (4, s. 1)

Edellä esitettyjen nykytilannetietojen perusteella voidaan todeta rakennuksen kosteusteknisen toimimattomuuden olevan todellinen ja kansantaloudellisesti merkittävä ongelma. Esi- tettyihin lukuihin voidaan peilata tarvittavien lisätoimenpiteiden kustannuksia sekä arvioi- da näiden järkevyyttä. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisussa tehdyn johtopäätök- sen mukaan rakentamisen lisävaatimusten vuosittainen kustannus ei lähtökohtaisesti saa ylittää yhtä miljardia euroa. Julkaisun mukaan tätä suurempi panostus olisi mahdollinen vain tiettyjen reunaehtojen täytyessä. Esimerkiksi 1,5 miljardin euron kertapanostus mer- kittävien kosteus- ja homevaurioiden korjaukseen olisi kannattava kolmen vuoden ta- kaisinmaksuajalla, mikäli kyseinen toimenpide vähentäisi vastaavasti terveydenhoidollisia tarpeita merkittävästi. (3, s. 150) Todelliset pitkäaikaiset hyödyt saadaan kuitenkin uudisra- kentamisen laatua parantamalla. Osana tätä on myös rakennusprojektin kosteudenhallinta, johon tämä diplomityö keskittyy.

2.2 Rakennusprojektin kosteudenhallinta rakennushankkeen ko- konaisuudessa

Maankäyttö- ja rakennuslain 117 § sekä maankäyttö- ja rakennusasetus määrittelevät ra- kennukselle olennaiset vaatimukset, jotka tulee tarkoituksenmukaisin suunnittelu-, raken- tamis- sekä ylläpitotoimenpitein saavuttaa. Nämä olennaiset vaatimukset koskevat seuraa- via yhdeksää osakokonaisuutta: rakenteiden lujuus ja vakaus, paloturvallisuus, terveelli- syys, käyttöturvallisuus, esteettömyys, meluntorjunta- ja ääniolosuhteet, energiatehokkuus, lämmitysjärjestelmän arviointi sekä rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje. Tarkoituksenmu- kaisella työmaan kosteudenhallinnalla pyritään vastaamaan erityisesti terveellisyysvaati- mukseen. Samalla tehdyt toimet ovat läheisessä yhteydessä myös muihin olennaisiin vaa- timuksiin, erityisesti käyttöturvallisuuteen ja energiatehokkuuteen. (5, 117§)

Maankäyttö- ja rakennuslaki avaa terveellisyysvaatimusta eri osakokonaisuuksina. Lain mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee toimillaan huolehtia siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan terveelliseksi ja turvalliseksi huomioiden rakennuksen sisäil- ma, kosteus-, lämpö- ja valaistusolosuhteet. Rakennus tulee siis aina suunnitella ja toteut- taa hallittuna kokonaisuutena sisäilmasto- ja sisäympäristötekijät huomioon ottaen. Laki korostaa rakennuksen osien kastumisen ja haitallisen kosteuden terveellisyydelle aiheutta- maa riskiä. (5, 117 c §)

Rakentamishankkeen perusvaatimuksena on saada eri osapuolet ymmärtämään rakennuk- sen käyttötarkoituksen sekä olennaisten vaatimusten suhde juuri kyseisessä työn alla ole- vassa projektissa. Yksinkertaisuudessaan tämä tarkoittaa, että käyttötarkoitukseltaan erilai- set rakennukset suunnitellaan ja toteutetaan eri tavalla, eri osa-alueita painottaen. Vastaa- vasti myös kosteudenhallinnassa voidaan riskien sietotaso asettaa eri tavalla: esimerkiksi varastohalleissa terveellisyysvaatimukset voivat olla alhaisemmat kuin päiväkotirakennuk- sissa. Olennaisen perusvaatimuksen näkökulmasta rakennusprojektin kosteudenhallinta tulee käsittää laajana kokonaisuutena sisältäen tällöin varsinaisen työmaatoiminnan lisäksi myös suunnittelullisia sekä ylläpidollisia seikkoja.

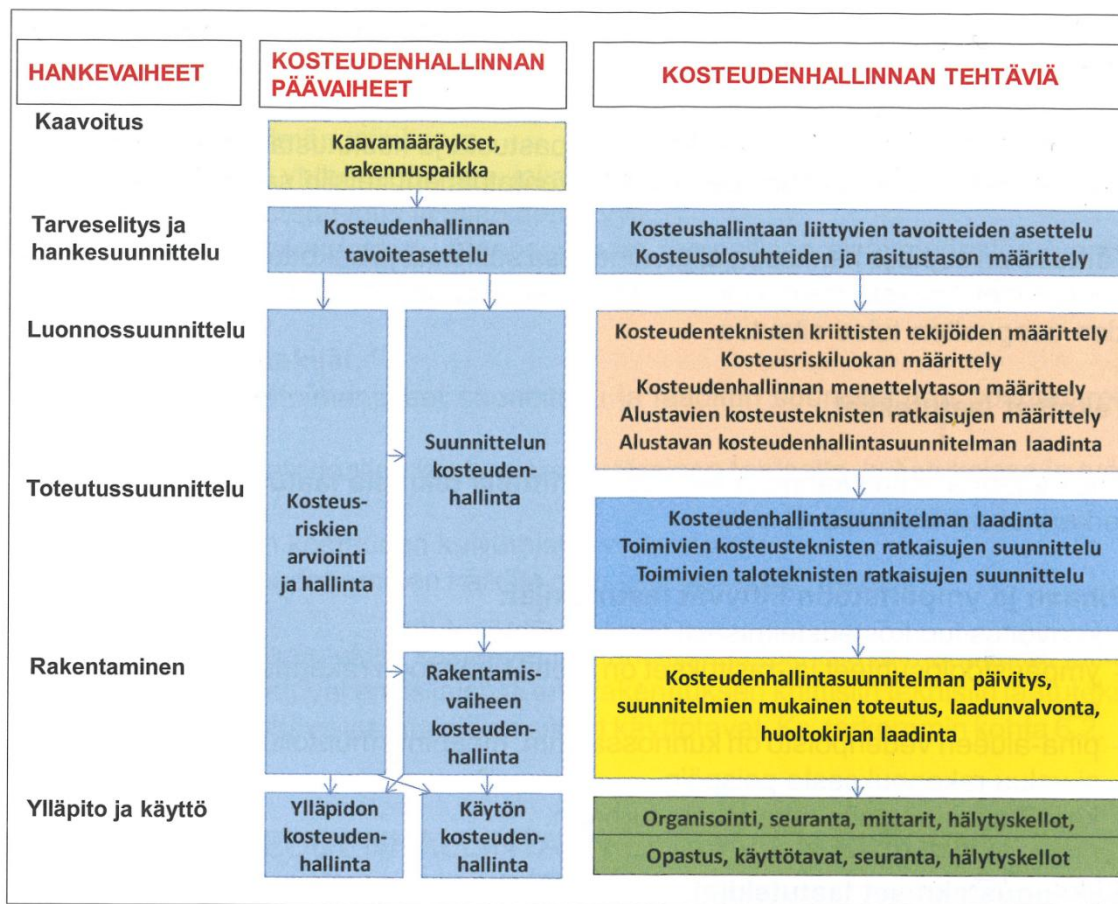
Rakennuksen kosteudenhallinnan merkitys ja samalla toimiin liittyvät haasteet tulevat tulevaisuudessa kasvamaan entisestään. Syinä tähän ovat esimerkiksi globaali ilmastonmuutos ilmiönä sekä sen mukanaan tuomat välilliset vaikutukset, kuten tiukentuvat energiatehokkuusvaatimukset ja matalaenergiarakentaminen. Suomessa ilmaston oletetaan muuttuvan seuraavan sadan vuoden aikana lämpimämmäksi ja kosteammaksi. Tämä lisää paitsi rakennukseen kohdistuvan kosteusrasituksen määrää, myös vähentää vuotuista aikaa rakenteiden kuivumiselle. Rakenteelle ei näin ollen jää aikaa palautua mahdollisista kosteusvaurioista, jolloin alun perin vähäisetkin kosteuskertymät voivat johtaa vuosien kuluessa merkittäviin vaurioihin. Energiankulutuksen vähentäminen on vaatinut jo nyt merkittäviä muutoksia rakennusten toteutustapaan. Jatkossa matalaenergiarakentaminen tulee olemaan lähtökohta kaikelle rakentamiselle. Tämä tarkoittaa yksinkertaistaen raskaammin eristettyjä ja tiiviimpiä rakenteita tehden jokaisesta uudesta rakennuksesta nykykatsannosta erikoiskohteen. Mahdollisissa poikkeustilanteissa tällaisten rakenteiden kuivuminen ja niin sanottu palautuminen normaalitilaan on hidasta. Monimutkaiset rakenteet sietävät aiempaa vähemmän toteutusvirheitä, jolloin rakentamisen kosteudenhallintaan asetetut vaatimukset kasvavat.(2, s. 17)

Edellisessä kappaleessa 2.1 tarkemmin esitellyssä Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisussa annetaan toimenpide-ehdotuksia kosteus- ja homevaurioiden ehkäisemiseksi, ongelmien selvittämiseksi ja korjaamiseksi, asiantuntijoiden ja toimijoiden osaamisen kehittämiseksi sekä vaurioihin liittyvään tutkimukseen ja seurantaan.(3, s. 152) Rakennusprojektiin ja toimintaan työmaalla näistä liittyy erityisesti tavoite kosteus- ja homevaurioiden ennaltaehkäisystä. Varsinaiseen työmaatason toimintaan liittyvät vaadittu prosessin ja kokonaisvastuiden selkeyttäminen, kosteusteknisten asioiden korostaminen suunnittelussa, laadunvarmistuksen ja –tarkastuksen toiminnan kehittäminen sekä rakennusaikaisen kosteudenhallinnan parempi huomioiminen.(3, s.152-155) Tämän osa-alueen toimenpide-ehdotuksiin sisältyvät myös rakennuksen elinkaaren ohjaukseen liittyvät asiat sekä aluehallintoviranomaisen yhteyteen perustettavaksi esitetyt erityisasiantuntijoiden virat. Lisäksi on annettu ehdotuksia käytönaikaisen toiminnan parantamiseen esimerkiksi toimenpidesuunnitelman ja kustannusvarausvaatimusten muodossa.

2.3 Kosteudenhallintaprosessin kulku

Rakennusprojektin kosteudenhallinta on tärkeää käsittää yhtenä laajana kokonaisuutena, joka pitää sisällään rakentamishankkeen koko kaaren jatkuen lopulta myös rakennuksen käytön aikaiseen toimintaan. Rakennuksen kosteudenhallinnan päätarkoitus on estää ylimääräisen kosteuden kertyminen rakenteisiin sekä poistaa rakennusaikainen kosteus. Mikäli näitä tavoitteita ei hankkeessa saavuteta, voi tuloksena olla käytön aikana havaittavia pinnoitevaurioita sekä pahimmassa tapauksessa kosteus- ja homevaurioita.(2, s. 11)

Kosteudenhallinnan varmistamisen keinoja ovat tehtävät toimet projektin suunnittelun, toteutuksen, ylläpidon sekä käytön aikana. Kaikkien näiden osa-alueiden tulee toimia saumattomasti yhteen sekä jakaa tietoa keskenään kokonaisuuden hallitsemiseksi. Kosteudenhallinta nousee esille yhtenä rakentamisen alan tärkeimmistä laatutekijöistä vaikuttaen niin prosessin kuin syntyvän lopputuotteen laatuun.(2, s.11-12) Rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessi koostuu viidestä päävaiheesta: tavoiteasettelu, suunnittelun kosteudenhallinta, rakentamisvaiheen kosteudenhallinta, ylläpidon kosteudenhallinta sekä käytön kosteudenhallinta. Päätehtävät jakautuvat hankkeen edetessä pienempiin osa-alueisiin. Päävaiheet ja näihin liittyvät tärkeimmät tehtävät on esitetty kuvan 1 kaaviossa. Kuten vaihejaosta nähdään, kosteudenhallinta nivoutuu läheisesti muuhun rakennuksen toimintaan koko elinkaaren ajan.



Kuva 1 Rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessin päävaiheet kaavoituksesta ja rakennuttamistoimien aloittamisesta käytön aikaiseen toimintaan. (2, s. 21)

Rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessi käynnistyy kosteudenhallinnan tavoitteiden asettamisella. Tavoiteasettelun tulee kehittyä tukemaan muita hankkeen tavoitteita ja lähtökohtia, vaikka käytännössä tavoitteet voivat lähtökohdiltaan olla myös ristiriidassa toistensa kanssa. Tyypillisenä esimerkkinä esteettisten tavoitteiden asettamat haasteet. Tällöin kompromissia haetaan tarkemman rakennusosakohtaisen tavoitetarkastelun kautta. Tavoiteasettelun lähtökohtana ovat rakennuttajan ennen suunnitteluvaihetta määrittelemät laatuvaatimukset. Näiden laatuvaatimusten tulisi olla selkeästi muodostettuja, ytimekkäitä tavoitetason kuvauksia. Määrittästyön tuloksena on eräänlainen kosteusteknisten tavoitteiden tarkastuslista, jonka avulla voidaan arvioida myös hankkeen aikaisten toimien tarkoituksenmukaisuutta. Listaan kerätään vaatimukset projektihallinnosta, suunnitteluratkaisuiden perusvaatimuksista, työmaavaiheen olosuohdehallinnasta sekä ylläpidon ja käytön aikaisesta toiminnasta. Listan tarkoituksena on herättää hankkeen jatkovaiheessa, erityisesti suunnittelutyössä, keskustelua ja kehittämisajatuksia. Toisaalta se antaa suunnitteluryhmälle selvät rajat ratkaisujen läpikäyntiin. Tarkastuslista toimii lisäksi työmaan kosteudenhallintasuunnitelman lähtötietona ja päätoteuttajan ohjenuorana jo tarjousvaiheesta lähtien. Näin myös työmaaorganisaatio saadaan sitoutettua rakennuttajan laadullisiin tavoitteisiin yksiselitteisemmin. (2, s. 25-27)

Suunnitteluvaiheen kosteudenhallinnan lähtökohtana on rakennuksen kosteusriskiluokan määrittely ja tätä kautta määräytyvä kosteudenhallinnan menettelytavan laajuus. Hankkeen kosteudenhallinnan vaativuus ja mahdollisista poikkeamista johtuvien seuraamusten vahinkotaso määrittävät kosteusriskiluokan. Luokituksen laativat rakennuttaja ja pääsuunnittelija yhteistyössä eri alojen erikoissuunnittelijoiden kanssa. Luokkia on käytössä kolme

vaativuuden kasvaessa luokkanumeron noustessa. Kosteusriskiluokan 3 osalta suunnittelu toteutetaan tehostetun menettelyn alaisena. Luokkien 1 ja 2 osalta riittää tavanomainen kosteudenhallinnan menettely. Tehostetun menettelyn erityisvaatimuksia ovat muun muassa suunnittelutyön normaalia laajempi laadunvarmistus, henkilöiden pätevyysvaatimusten kiristyminen sekä ulkopuolisten konsulttien ja asiantuntijoiden käyttö. Näiden valittujen suuntaviivojen perusteella suunnittelutyötä viedään eteenpäin koko hankkeen ajan. (2, s. 28-29) Suunnittelutyön yhteydessä tehdään jatkuvaa kosteusriskien kartoitusta, rakennuttajan tavoiteasettelun mukaisten toimien varmistamista sekä jatkuvaa suunnitelmien kosteusteknistä laadunvalvontaa. Kuten kaikilla rakentamisen osa-alueilla, myös kosteudenhallinnassa suunnitteluvaiheen ratkaisulla mahdollistetaan laadukas työmaatoteutus sekä luodaan edellytykset kosteudenhallintakeinojen suorittamiselle. Parhaimmillaan suunnittelutyötä päästään tekemään tiiviissä yhteistyössä työmaaorganisaation kanssa, jolloin toteutuksen erityispiirteet voidaan ottaa huomioon. Näistä esimerkkeinä materiaaleihin, työjärjestykseen ja työnaikaiseen sääsuojaukseen liittyvät asiat.

Varsinaisen työmaan rakentamisvaiheen kosteudenhallinnan tehtävänä on noudattaa kosteudenhallintaprosessin aikana määriteltyä tavoiteasettelua työmaatekniikan ja – toteutuksen keinoilla. Kosteudenhallinnassa onnistuminen on rakentamisen lopputuotteen kannalta yksi tärkeimmistä laatutekijöistä. Rakentamisvaiheessa työmaan kosteudenhallinnan päätehtäviä ovat materiaalien ja tuotteiden haitallisen kastumisen estäminen, rakenteiden riittävän kuivumisen varmistaminen sekä kuivatustarpeen vähentäminen. (2, s. 94) Kaikki nämä tavoitteet on lisäksi saavutettava asetetuissa aikataulu- ja kustannuspuitteissa. Seuraavassa on kuvassa 2 esitetty vaiheittain prosessi, jonka avulla päätehtävien mukaiset vaatimukset voidaan täyttää. (2, s. 94) Prosessi sisältää toimenpiteitä, jotka tehdään osittain jo ennen varsinaisen työmaatoiminnan aloittamista ja jatkuvat aina rakennuksen käyttöönottoon saakka. Kosteudenhallintatoimenpiteet eivät koskaan ole irrallisia tehtäviä, vaan ne ovat jatkuvasti yhteydessä muihin rakentamisen osa-alueisiin.



Kuva 2 Työmaa-aikaisen kosteudenhallintaprosessin vaiheet.

Kosteudenhallintaprosessin kulku ja sisältö kirjataan työmaan kosteudenhallintasuunnitelmaan, jonka avulla tavoitteet jalkautetaan koko organisaation tietoon. Kosteudenhallintasuunnitelma tulee aina laatia työmaakohtaisesti, jotta kunkin hankkeen erityispiirteet tulee huomioitua. Työmaan kosteudenhallinnassa raportointi on merkittävässä osassa, jotta teh-

dyt toimet ja kerätty mittaustieto siirtyvät myös rakennuksen tulevan käyttäjän sekä huollosta ja ylläpidosta vastaavan organisaation tietoon. Mahdollisissa poikkeamatilanteissa työmaa-aikaisen kosteuskirjallisuuden avulla voidaan kartoittaa vaurioiden syntymekanismeja helpommin kuin ilman lähtötietoja.

Rakennuksen käytön ja ylläpidon aikainen kosteudenhallinta muodostaa luonnollisesti hankkeen ajallisesti pisimmän vaiheen ollen useita vuosikymmeniä kestävä. Tuona aikana rakennuksessa ja sen ympäristössä ehtii tapahtua monia muutoksia, luonnollista kulumista sekä materiaalien vanhenemista. Todennäköistä on, että käytön aikana tapahtuu myös useita vauriotilanteita eri syistä johtuen. Ylläpitovaiheessa vastuu rakennuksesta on ennen kaikkea sen omistajalla, mutta toimintaan kytkeytyvät läheisesti myös kiinteistön ylläpito- ja huoltohenkilöstö sekä käyttäjät. Nykyisin monissa tapauksissa myös hankkeen toteuttanut rakentaja sitoutetaan käytönaikaisiin toimiin esimerkiksi energiansäästö- tai virheettömyystavoittein ja –kannustimin. Käytönaikainen kosteudenhallinta perustuu ennen kaikkea rakennuksen kosteusteknisen toiminnan tuntemiseen, kriittisten rakenteiden ja järjestelmien laatutekijöihin sekä rakennuksen suunnitellun käyttötarkoituksen mukaiseen toimintaan. Prosessissa olennaisena osana ovat ylläpitohenkilöstön jatkuva rakennuksen osien seuranta ja huolto. Poikkeamiin reagoinnin tulee olla nopeaa ja tarkoituksenmukaista. Tänä päivänä erityisesti talotekniset järjestelmät yhdistettynä aiempaa tiiviimpiin vaipparakenteisiin korostavat ylläpidon tärkeyttä. Rakennuksen teknisten järjestelmien suunnitelmien mukainen toiminta ja säätötila ovat oleellisia. (2, s. 115-117)

3 Rakennekosteuden kuivattamisen merkitys

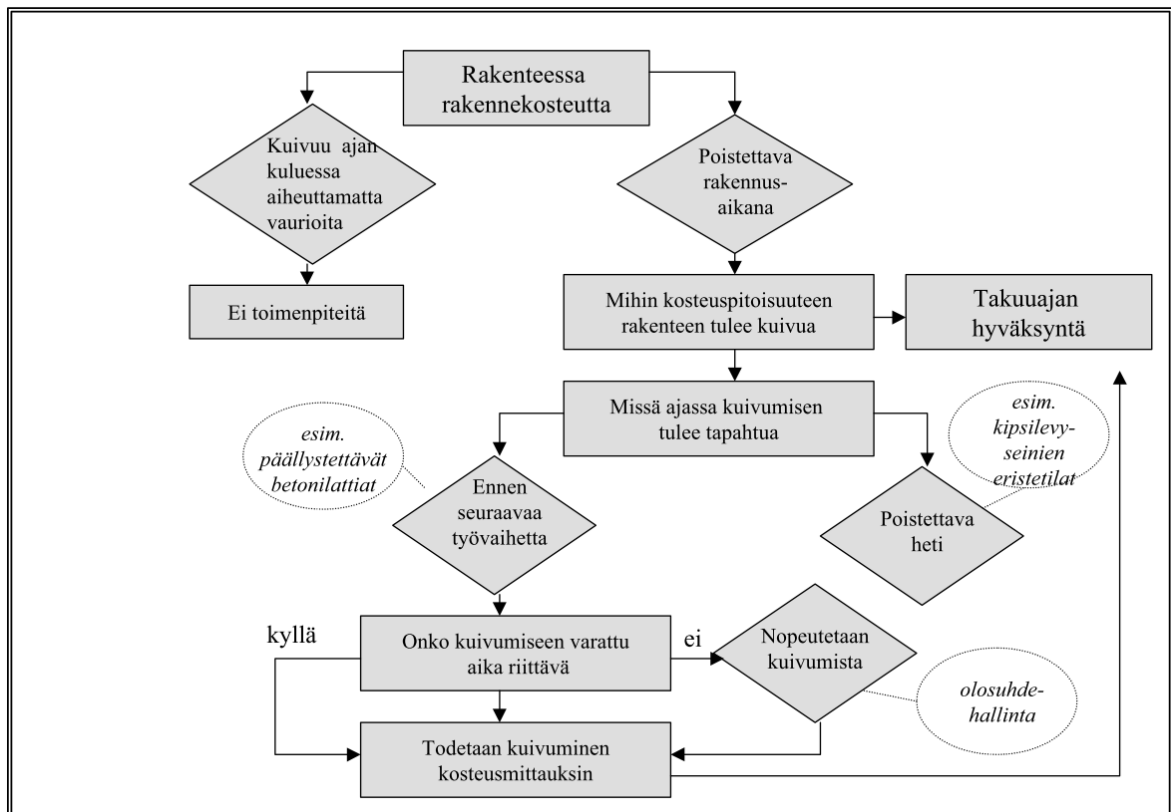
3.1 Rakennekosteuden kuivattaminen osana kosteudenhallintaprosessia

Suureen osaan rakenteita sitoutuu niiden valmistamisen myötä rakennekosteutta. Tämä ylimääräinen kosteus tulisi saada poistettua rakenteista mahdollisimman tehokkaasti ennen rakennuksen käyttöönottoa tai vaihtoehtoisesti varmistaa kosteuden poistuminen hallitusti myös rakennuksen käytön aikana ilman tiloissa oleskeleville henkilöille aiheutuvaa haittaa. Tyypillisiä rakennekosteuden lähteitä ovat materiaalin itsensä sisältämä liika vesi, materiaalin valmistamiseen käytetty vesi sekä rakennusaikainen sade ja työmaalla käytetty vesi.

Erityistapauksena on betoni, jonka rakennekosteuden poistamisen päätavoitteena on saavuttaa kullekin pinnoite- ja päällystysmateriaalille sopiva alustan kosteus rakennusaikana työmaaolosuhteissa. Liian kostealle betonipinnalle suoritettu pinnoittaminen sisältää aina merkittävän riskin. Riskin suuruuteen vaikuttavat useat tekijät aina tilan käyttötarkoituksesta betonin ja pinnoitemateriaalin ominaisuuksiin. Riskin minimoimisen osalta helpoin tapa on oikeanlaisten ja tarkoituksenmukaisten pinnoitteiden käyttö. Käytännössä tämä tarkoittaa riittävän vesihöyrynläpäisevyyden omaavia materiaaleja tai kuivattamisajan pidentämistä.

Rakennekosteuden poistaminen muodostaa koko työmaan kosteudenhallinnan kokonaisuudessa oman prosessinsa, jonka kulku on kuvattu oheisessa kuvassa 3. Prosessin alkutietoina ovat rakennukseen suunniteltujen erilaisten rakenteiden tunnistaminen ja luokittelu. Rakenteista tulee ensinnäkin tunnistaa ne, joita joudutaan erikseen kuivattamaan. Näistä tyypillisin esimerkki ovat kohteen betonirakenteet. Rakenteiden tunnistamisen jälkeen tulee määritellä tavoitekosteus, johon kuivattamisella pyritään sekä arvio kuivumisen vaati-

masta ajasta. Varsinaisten kuivattamistoimien aikana tilannetta seurataan säännöllisin mitauksin reagoiden samalla mahdollisiin poikkeamiin ennakoarvioinneista.(2, s. 99-101)



Kuva 3 Rakennetekstien kuivattamisen prosessikaavio. (6, s. 16)

Tämän diplomityön kappaleissa 3.2, 3.3 ja 3.4 käydään läpi tyypilliset vauriotyypit, jotka ovat joko välittömästi tai välillisesti seurausta liian kostealle betonirakenteelle tehdystä pinnoittamisesta tai liittämisestä ympäröiviin kosteudelle herkkiin rakenteisiin. Toisin sanoen vauriotyypit ovat pääseseet syntymään johtuen epäonnistuneesta rakennetekstien kuivattamisprosessista. Tällöin betonirakenteen kosteussisältö on pinnoitushetkellä liian korkea tai se pääsee pinnoituksen jälkeen nousemaan ulkopuolisesta kosteusrasituksesta johtuen.

Tyypillisiä vauriotyyppejä ovat pintamateriaalin irtoaminen ja ulkonäkövaihtelut, pintamateriaalin ja tasoitteiden mikrobivauriot sekä kosteuden aiheuttamat kemialliset reaktiot ja näiden seurauksena syntyvät emissiot sisäilmaan.(7, s. 32). Näitä vauriotyyppejä tarkastellaan lähemmin omissa kappaleissaan. Lähtökohtana on huomioitava, että rakennusmateriaalina puhdas betoni on erittäin hyvin kosteutta kestävä ja lahoamaton materiaali.(7, s. 32) Puhtaaseen betonipintaan ei käytännössä aiheudu mikrobikasvusta merkittävässä määrin edes kasvustoille suosiollisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa, vaan mikrobit vaativat kasvaakseen jonkinlaisen orgaanisen kerroksen betonipintaan.(8, s.3) Ongelman muodostaakin pinnoitteen ja kosteusherkin liittymärakenteen käyttäytyminen betonin tuottaman kosteusrasituksen vaikutuksessa.

Betonin kosteussisällössä tapahtuvat muutokset aiheuttavat itse betoniin muodonmuutoksia kutistumisen, halkeamien ja turpoamisen muodossa.(7, s. 32) Lisäksi betonin kosteus aiheuttaa vaurioita liittyviin kosteusherkkiin rakenteisiin, kuten puuosiin.(9) Kyseisiä vauriotyyppejä ei tarkemmin käsitellä tässä diplomityössä, sillä ne eivät suunnitteluprosessin

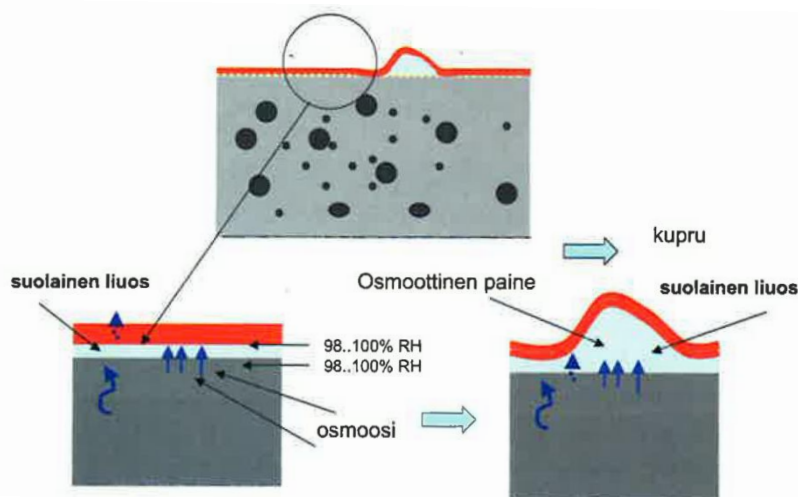
osatekijöinä suoraan liitty työmaan kosteudenhallintatoimenpiteisiin ja rakenteen kuivattamiseen.

3.2 Vauriotyyppi 1: pintamateriaalin irtoaminen ja ulkonäkövaihdelut

Betonissa oleva rakennekosteus aiheuttaa pintamateriaalin muodonmuutoksia ja irtoamista alustastaan pääasiassa kahdesta syystä: johtuen joko betonin muodonmuutoksista tai itse pintamateriaalin muodonmuutoksista. Tyypillisenä betonin muodonmuutoksesta johtuvana vauriona on kuivumiskutistumasta johtuva lattiamateriaalin irtoaminen alustastaan. Tällöin runkorakenteena toimiva betoni on pinnoituksen jälkeen kuivunut voimakkaasti aiheuttaen pinnoitteen rajapintaan epäjatkuvuuskohdan. (7, s. 35) Näissä tapauksissa huomio tulee kohdistaa erityisesti pinnoitteen kiinnitysjärjestelmän, esimerkiksi laatoituksen tapauksessa kiinnityslaastin muodonmuutoskykyyn ja kiinnipysymiseen. Vaihtoehtoisesti betonin korkea rakennekosteus voi kulkeutuessaan aiheuttaa muodonmuutoksia myös pintamateriaaliin. Pintamateriaalit ovat tällöin tyypillisesti puurakenteisia, kuten parketteja ja laminaatteja. Pinnoitteet turpoavat kosteuden vaikutuksesta ja saattavat tällöin irrota alustastaan esimerkiksi parkettiliimauksen pettäessä. (7, s. 36)

Betonin liian aikaisesta pinnoittamisesta johtuva korkea rakennekosteus voi aiheuttaa myös rakenteeseen yhtyvien tasoitteiden ja kiinnitysaineiden kemiallista hajoamista. Tämän hajoamisen seurauksena esimerkiksi liimojen kiinnipysyminen voi heiketä oleellisesti pienentäen samalla koko pinnoitekokonaisuuden tartuntaa alustaansa. Rasituksen alaisena olevissa käyttökohteissa tämä aiheuttaa pinnoitteen irtoamisen alustastaan. Rasitus voi olla käytöstä ja ympäristöstä johtuvaa mekaanista kulutusta tai vaihtoehtoisesti alustan lämpö- ja kosteusliikkeistä aiheutuvaa. Kiinnitysmateriaalissa tapahtuva hajoaminen voi tietyissä tapauksissa kehittää myös erinäisiä kaasulomuodossa olevia reaktiotuotteita. Nämä kaasut aiheuttavat tiiviissä pinnoitteessa pinnan laatua heikentävää kupruilua ja epätasaisuutta. (7, s. 40)

Betonin rakennekosteuden noustessa yli 97 prosentin suhteelliseen kosteuteen puhutaan kosteuden olevan niin sanotulla kapillaarisella alueella. Tällöin on mahdollista, että myös betonissa olevat suolat lähtevät liikkeelle ja nousevat kosteuden mukana betonin ja pinnoitteen rajapintaan. Pitoisuuden kasvaessa suolat alkavat imeä ympäristöstään kosteutta osmoottisesti pyrkien näin tasoittamaan rakenteessa vallitsevaa suolojen konsentraatioeroa. Tässä yhteydessä pinnoitteen alle syntyvä paine aiheuttaa pintamateriaalin kupruilua edellä esitetyn kaasunmuodostuksen tavoin. Tämä niin sanottu osmoottisen paineen aiheuttama ilmiö vaatii tapahtuakseen tiiviin kalvon rakenteen pintaan eli käytännössä vettä läpäisemättömän pinnoitteen. Ilmiön peruseriaate on esitetty oheisessa kuvassa 4. (7, s. 41)



Kuva 4 Osmoottisen paineen aiheuttama vauriomekanismi (7, s. 40)

Pintamateriaalien irtoamisen yhteydessä saattaa tapauskohtaisesti olla haastavaa päätellä vaurion todellista syytä. Esimerkiksi puupohjaiset materiaalit ovat alustan kosteuden lisäksi herkkiä myös sisäilman ja muun ympäristön kosteuslähteille. Varsinkin kelluvissa rakenteissa vauriot, kuten raot ja epätasaisuudet tulee tiedostaa olevan paremminkin materiaalille tyypillisiä piirteitä, jotka vaihtelevat vuodenaikojen myötä.(7, s. 36) Pintamateriaalin irtoaminen ja ulkonäkövaihtelut ovat vauriotyyppinä lähinnä esteettisiä ja toimintaa haittaavia tekijöitä eivätkä aiheuta esimerkiksi mikrobivaurioon verrattavaa terveysriskiä tilan käyttäjille. Tästä huolimatta näihinkin vaurioihin tulisi suhtautua vakavasti ja niiden syy selvittää, sillä kyseessä voi olla merkki suuremmasta alkavasta kosteusvauriosta. Lisäksi pinnoitteen vaurio aiheuttaa aina epäjatkuvuuskohdan, jonka kautta alapuolinen betonirakenne altistuu mahdollisesti myös lisäkosteudelle ja aiheuttaa näin riskin merkittävämmälle ongelmalle.(7, s. 40)

3.3 Vauriotyyppi 2: pintamateriaalin ja tasoitteiden mikrobivauriot

Rakenteen mikrobivaurion synty on monen osatekijän summa. Mikrobin eli homeiden, sienien ja bakteerien kasvu vaatii paitsi sopivat kosteus- ja lämpöolot myös orgaanisen aineen esiintymisen sekä riittävän happipitoisuuden. Lisäksi osatekijöiden tulee esiintyä yhtäaikaaisesti riittävän pitkän jakson ajan, jotta kasvusto pääsee muodostumaan ja kasvaamaan. Esimerkiksi betonin rakennekosteuden kuivuminen kestää vuosikymmeniä. Näin ollen tarkasteltava ajanjakso on useissa tapauksissa erityisen pitkä. Herkkyydelle mikrobikasvustojen syntymiseen on materiaalien välillä suuria eroja.(7, s.34) Tarkasteltaessa useiden materiaalien yhdistelmiä mikrobikasvustojen osalta asia monimutkaistuu entisestään. Mikrobivauriot aiheuttavat lähes poikkeuksetta merkittävän terveysriskin niille altistuville henkilöille.

Puhdas betoni on mikrobin kasvualustana huono. Tämä johtuu betonin epäorgaanisuudesta ja alkalisuudesta. Betonissa itsessään havaitaankin mikrobikasvustoa vain tilanteissa, joissa betonipintaan on kertynyt orgaanista ainesta esimerkiksi likaa tai jonkin tilan prosessin sivutuotetta. Tällöinkin betonin ominaisuudet pyrkivät hidastamaan kasvuston kehittymistä (7, s. 34) Rakennekosteudesta johtuvan mikrobikasvuston riskin voidaan todeta olevan pelkälle betonirakenteelle lähes olematon.

Mikrobikasvustoja muodostuu herkimmin orgaanista ainesta sisältäviin rakennusmateriaaleihin. Betonirakenteiden yhteydessä näistä yleisimmin käytettyjä ovat parketti- ja puupinnoitteet sekä linoleum-, korkki- ja laminaattituotteet. Lisäksi orgaanisia aineita on useissa tasoitteissa ja kiinnitysliimoissa. Mikäli pintamateriaaleina käytetään orgaanisia aineita sisältäviä materiaaleja, tulee näiden olla ominaisuuksiltaan hyvin vesihöyryä läpäiseviä. Tällöin betonista vääjäämättä kulkeutuva rakennekosteus ei keräänny betonin ja pinnoitteen rajapintaa aiheuttamaan pitkäaikaista kosteusrasitusta.(7, s. 34)

Mikrobivaurioiden välttämiseksi on turvallisinta käyttää täysin epäorgaanisia pinnoitteita ja tasoitteita. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sementtipohjaisten tasoitteiden ja kiinnityslaastien käyttöä yhdessä muovi- ja kivipohjaisten pinnoitteiden kanssa.(7, s. 34) Näissä tapauksissa pinnoitteet voivat lopullisessa muodossaan olla myös niukasti vesihöyryä läpäiseviä ilman, että ne aiheuttavat mikrobivaurion riskin merkittävää kohoamista. Toisaalta tiivis pinnoite estää myös sisäilman hapen kulkeutumisen rakenteeseen sekä betonin ja pinnoitteen rajapintaan. Tällä voi olla tilannekohtaisesti suurikin vaikutus mikrobikasvuston määrään.(10, s. 30) Pitkällä aikavälillä ja pinnoitteen ominaisuuksien muuttuessa tilanne voi olla toinen. Lisäksi happea pääsee lähes poikkeuksetta kulkemaan pinnoitteiden saumakohdista, esimerkiksi vinyylilaattojen rajoista.

Mikrobivauriotyyppin kannalta pahin tilanne on siis pinnoitushetkellä kostean betonirakenteen ja tiiviin orgaanisen pinnoitemateriaalin yhdistelmä, jolloin edellä esitetyt mikrobikasvuston syntymisen edellytykset syntyvät lähes poikkeuksetta. Mikrobivaurioriskin välttämiseksi on vaikeaa antaa yksiselitteistä raja-arvoa rakennekosteudelle. Syynä tähän on mikrobien synnyn ja kasvamisen monimutkainen ja monesta osatekijästä riippuva prosessi. Kasvustojen välttämiseksi tulisi kiinnittää huomiota erityisesti betoniin liittyviin rakenteisiin sekä näiden kosteusteknisiin ominaisuuksiin ja kestävyYTEEN. Ongelmia havaitaan yleisimmin juuri kerroksellisissa rakenteissa sekä materiaalien ollessa orgaanisia.(7, s. 34)

3.4 Vauriotyyppi 3: kosteuden aiheuttamat kemialliset reaktiot ja näiden emissiot

Rakennuksen käyttäjän terveyden kannalta merkittävin ja yleisin vauriotyyppi on rakennekosteuden aiheuttamat emissiot. Materiaaliemissioilla tarkoitetaan materiaalin pinnasta tapahtuvia yhdisteiden haihtumisilmiöitä, joiden tuloksena sisäilmassa esiintyy haitallisia kaasulomuodossa olevia aineita. Yhdisteet ovat peräisin materiaalissa, monissa tapauksissa materiaaliyhdistelmissä, tapahtuvista kemiallisista reaktioista.(7, s. 36)

Uudet materiaalit aiheuttavat aina asennustyön jälkeen sisäilmaan emissioita. Näitä heti rakentamisen jälkeen havaittavia päästöjä kutsutaan ominais- tai primääriemissioiksi. Primääriemissiot vähenevät rakennuksen käyttöönoton jälkeen vähitellen, sillä niiden alkupe-
rä on materiaalin tuotannossa ja raaka-aineissa. Primääriemissioiden lisäksi materiaaleista saattaa ulkoisten vaikutusten myötä emittoitua myös niin sanottuja sekundääriemissioita. Rakennusmateriaaleissa sekundääriemissioita aiheuttavat kemialliset reaktiot ovat yleensä seurausta kosteus- tai lämpötilaolojen muuttumisesta materiaaleille epäsuotuisiksi. Yhtenä esimerkkinä on betonin rakennekosteuden liiallinen määrä. Olennainen vaikutus on myös tilan ilman vaihtuvuudella.(7, s. 36-39)

Materiaaliemissiot heikentävät rakennuksen sisäilmaston laatua ja saattavat aiheuttaa käyttäjilleen merkittävää terveydellistä haittaa. Erilaisten kosteusperäisten vaurioiden terveydellisiä seurauksia on käsitelty tämän diplomityön kappaleessa 2.1. Terveysvaikutusten

lisäksi emissioista seuraa epämiellyttäviä hajuja sekä esteettistä haittaa. Sisäilman laadun kannalta merkittävimpiä emissioita ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joita nimitetään yleisesti VOC-yhdisteiksi (Volatile Organic Compounds). VOC-yhdisteet käsittävät useita eri aineita, joista rakennusten pintamateriaalien päästöjen osalta merkittävimmät on esitetty oheisessa taulukossa 1. (7, s 37)

Taulukko 1 Yleisten pintamateriaalien emittoimat VOC-yhdisteet (7, s 37)

Rakennusmateriaali	VOC-yhdiste/yhdisteryhmä
Muovimatto (PVC)	Alkaanit, aromaattiset yhdisteet, 2-etyyliheksanoli, TXIB-esteriyhdiste
Parketti	C ₅ -C ₆ -aldehydit, terpeenit
Linoleum	C ₅ -C ₁₁ -aldehydit, alifaattiset hapot, bentsaldehydi
Kumimatto	Asetonifenoni, alkyloidut aromaattiset yhdisteet, styreeni
Liima	C ₉ -C ₁₁ -aldehydit, tolueeni, styreeni
Lakka	Alkaanit, aldehydit

Saman rakennusmateriaaliryhmän välillä päästöjen suuruus sekä VOC-yhdisteiden koostumus vaihtelevat suuresti. Materiaalivalinnan helpottamiseksi materiaaleja luokitellaankin eri materiaaliluokkiin. Esimerkiksi Sisäilmayhdistys jakaa materiaalit kahteen luokkaan, M1 ja M2. Näistä M1-luokan materiaalit ovat vähemmän emittoivia tuotteita. VOC-yhdisteiden lisäksi luokituksessa ovat kriiteerinä raja-arvot myös ammoniakille sekä formaldehydille. Huomioitavaa on, että lähtökohtaisesti vähäpäästöistenkin materiaalien ominaisuudet voivat muuttua esimerkiksi rakennekosteuden vaikutuksesta.(11, s. 17) Kuten edellä esitetystä taulukosta nähdään, sisäilma voi tapauskohtaisesti sisältää useita VOC-yhdisteiksi luokiteltavia kaasuja. Yleisesti käsitelläänkin ilman VOC-yhdisteiden yhteispitoisuutta, josta käytetään lyhennettä TVOC. Tälle TVOC-pitoisuudelle on asetettu suosituksia rakennuksen käyttötarkoitusten mukaan. Oheisessa taulukossa 2 on esitetty Sisäilmayhdistyksen laatiman vuoden 2000 Sisäilmastoluokituksen mukaiset raja-arvot.(12, s 6) Lisäksi taulukossa on esitetty vuoden 2008 Sisäilmastoluokituksen mukaiset materiaalien emissioraja-arvot.(11, s. 17)

Taulukko 2 Sisäilmastoluokituksen 2000 TVOC-raja-arvot sisäilmalle (12, s. 6) sekä Sisäilmastoluokituksen 2008 TVOC-raja-arvot rakennusmateriaaleille (11, s. 17)

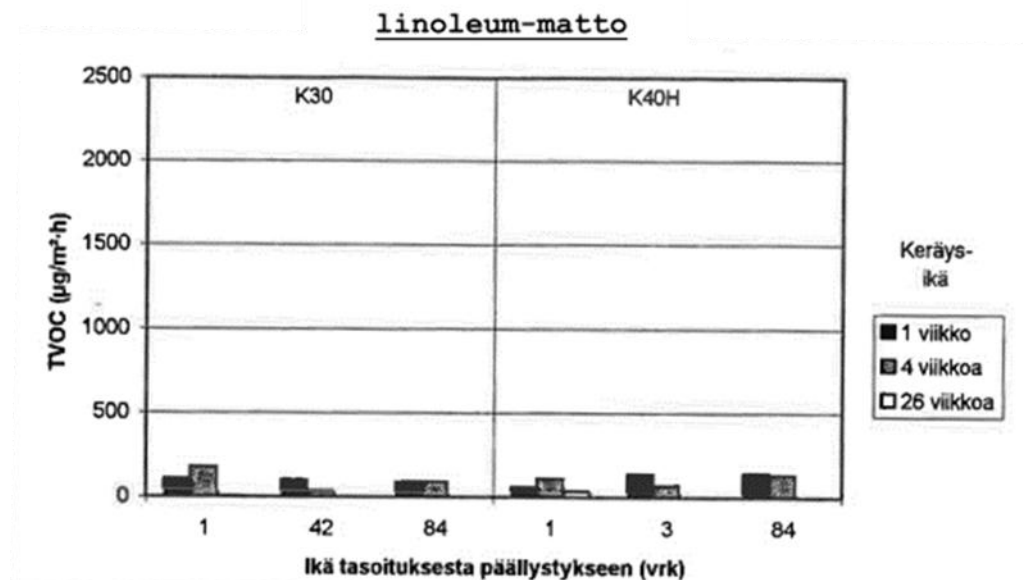
Sisäilmastoluokan mukainen TVOC-enimmäisarvo, µg/m ³		Materiaaliluokituksen mukainen TVOC-enimmäisarvo, mg/m ² h	
S1	200	M1	0,2
S2	300	M2	0,4
S3	600		

Sisäilman pitoisuuden raja-arvot on jätetty uudemman vuoden 2008 luokituksesta kokonaan pois, ja tilalle on tullut suora vaatimus M1-luokiteltujen materiaalien käytöstä sisäilmasta saatavien mittaustulosten sijasta. Syinä tähän ovat Sisäilmayhdistyksen antaman tiedon mukaan se, ettei suunnittelijoilta löydy tällä hetkellä työkaluja sisäilman tavoitearvioihin perustuvaan suunnitteluun sekä arvojen todentamisen haastavuus.(13, s. 2) Muissa maissa raja-arvot vaihtelevat ilman laatuluokasta riippuen 200 ja 500 µg/m³ välillä.(14, s.5)

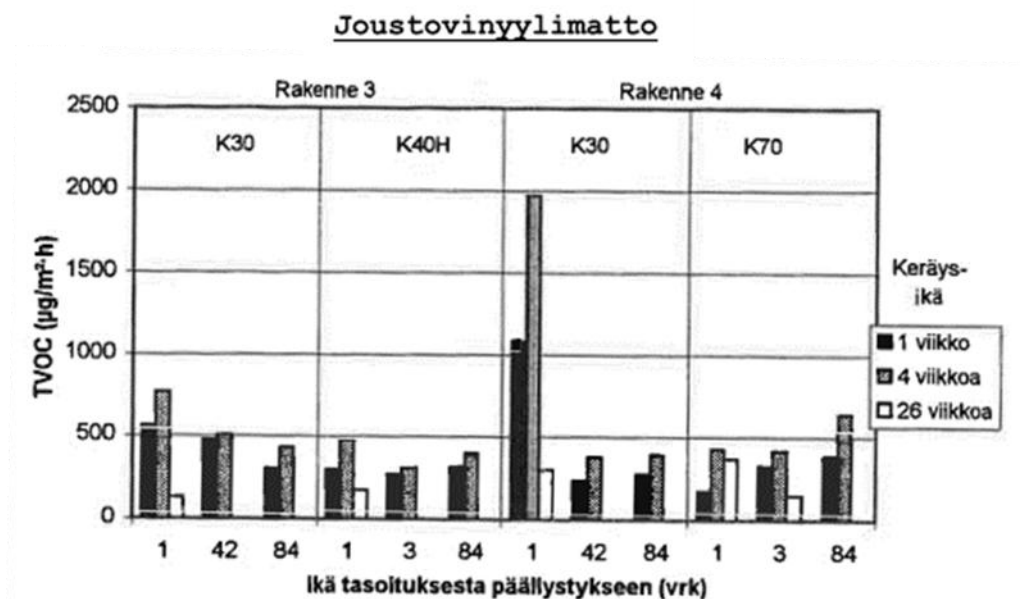
Liian kostealle betonipinnalle pinnoittamisesta aiheutuu merkittävä sekundäriemission riski. Tällöin emissioita muodostuu yleensä betoniin yhteydessä olevissa tasoitteissa, liimoissa sekä pinnoitteissa. Tyypillinen tapaus on kostean lattiarakenteen päälle asennetun lattiamaton emittointi. TVOC-emissioiden määrä vaihtelee tapauskohtaisesti voimakkaasti hajoamisreaktioiden monimutkaisuuden ja muuttujien lukumäärän vuoksi. Emissiovoimakkuuteen vaikuttavat lukuisat materiaaliominaisuudet niin alusbetonissa kuin pinnoitekerroksen materiaaleissakin. Näiden tekijöiden vaikutus voidaan ottaa huomioon materiaallivalintoja tehdessä käyttämällä mahdollisuuksien mukaan liuotteettomia ja vesiliukoisia tuotteita.

Teknillisessä korkeakoulussa vuonna 1998 tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin eri betonilattajien ja pintamateriaaliyhdistelmien TVOC-emissioita. Tutkimuksessa todettiin, että eri materiaaliyhdistelmien välillä on suuria eroja haihtuvien aineiden koostumuksissa. Tämä vaikeuttaa osaltaan saatujen arvojen vertailua eri materiaaliyhdistelmien välillä ja täysin luotettavasti vertailua voidaan tehdä ainoastaan kahden täysin samalla tavalla pinnoitetun sekä saman alusbetonin sisältämän rakenteen välillä. (10, s. 17)

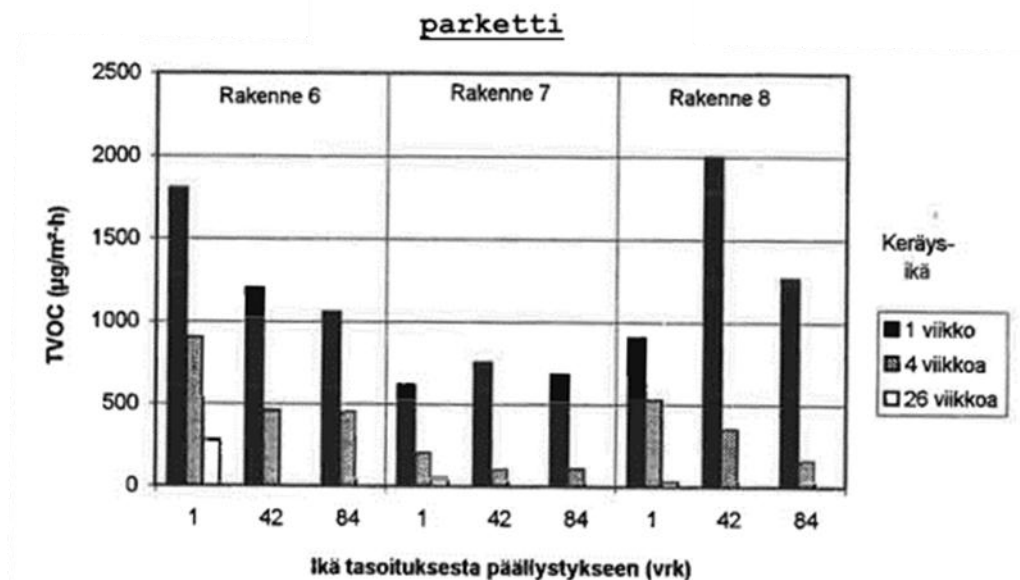
Tutkimuksessa tehtyjen koekappaleiden ja – rakenteiden perusteella voidaan kuitenkin tehdä selvä johtopäätös rakennekosteuden ja TVOC-emissioiden yhteydestä. Aikaisemmassa vaiheessa pinnoitetut, ja täten korkeamman rakennekosteuden omaavat rakenteet aiheuttivat lähes poikkeuksetta korkeammat päästöt sisäilmaan. Tähänkin korrelaatioon tosin vaikuttivat osaltaan pintamateriaalin ominaisuudet. Esimerkiksi linoleum-maton arvioitiin absorboivan osan syntyvistä yhdisteistä sekä olevan niin tiivis, että sisäilmaan kulkeutuneen emission pitoisuus oli suhteellisen pieni. Materiaalien välisten erojen kuvaamiseksi on oheisissa kuvissa 5, 6 ja 7 on esitetty tutkimuksessa valmistettujen koerakenteiden TVOC-pitoisuudet eri materiaaliyhdistelmille sekä pinnoitusajankohdille. (10, s. 17-19)



Kuva 5 TKK:n tutkimuksessa kerätyt TVOC-emissiot linoleum-matolla päällystetystä koerakenteesta (10, s. 18)



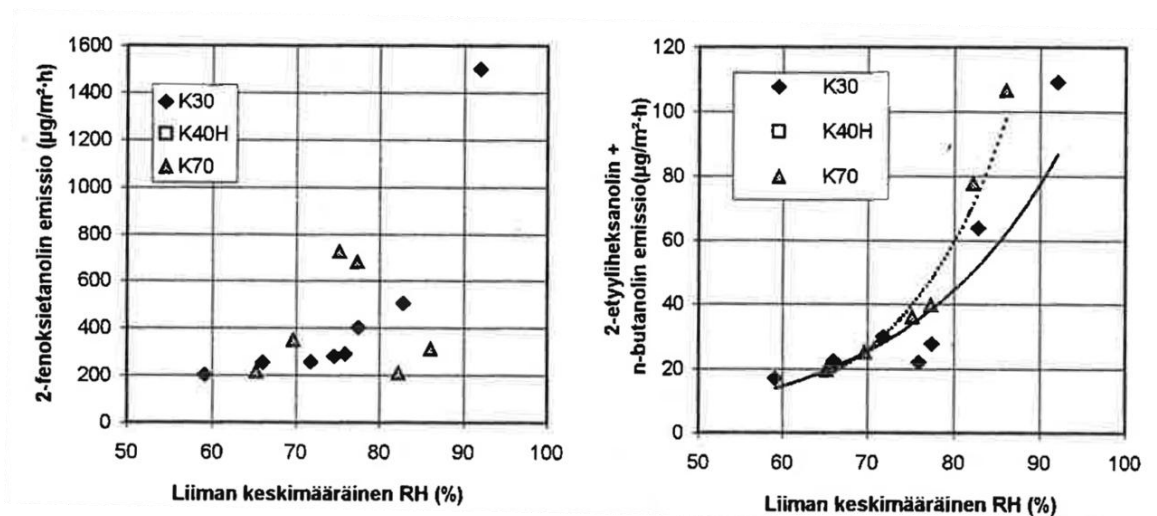
Kuva 6 TKK:n tutkimuksessa kerätyt TVOC-emissiot joustovinyylimatolla päällystetystä koerakenteesta (10, s. 17)



Kuva 7 TKK:n tutkimuksessa kerätyt TVOC-emissiot parketilla päällystetystä koerakenteesta (10, s. 18)

Joustovinyylimatoilla pinnoitetuissa koerakenteissa TVOC-emissiot pysyvät melko tasaisena eri pinnoituskosteuksien välillä, lukuun ottamatta rakenteen 4 osalla havaittavaa piikkiä, joka sekin tasaantuu tarkastelujaksolla muiden koekappaleiden pitoisuuksien tasolle. Kuten todettua, linoleum-laattojen osalta pitoisuudet pysyvät alhaisina koko tarkastelujakson ajan. Parkettipäällysteissä on havaittavissa säännöllisesti alkuvaiheen korkeata TVOC-pitoisuutta lakkauksen primääriemissioista johtuen, joka sekin tasoittuu tarkastelujaksona olevan puolen vuoden aikana. Primääriemissioiden jälkeen parketin ainoaksi merkittäväksi emissiolähteeksi jää alusliimassa tapahtuvat reaktiot. Ilmiön monimuotoisuutta kuvastaa se, että TVOC-emissioiden määrään vaikuttaa myös parketin puulaji. Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkimuksessa tarkasteltujen koerakenteiden osalta TVOC-emissioiden pitoisuudet putosivat puolen vuoden aikana melko maltillisiin lukemiin jäaden monissa tapauksissa M1-rakennusmateriaaliluokan tasolle.

Rakennekosteuden vaikutus pintamateriaalin emissioihin vaihtelee eri materiaalien välillä. Oleellista on määrittää käytetyn kiinnitystavan vaatimukset alustan kosteudelle. Yleisesti sisäilmaongelmaa aiheuttavat nimenomaan pinnoitteen kiinnitykseen käytetyt liimatuotteet. Oheisessa kuvassa 8 on esitetty kahden emission, 2-fenoksietanolin sekä 2-etyyliheksanolin + n-butanolin pitoisuudet 4 viikon kuluttua pinnoittamisesta. Käyrästä nähdään, että kosteuden noustessa yli RH 90 prosentin on emission pitoisuus varsinkin 2-etyyliheksanolin + n-butanolin osalta kasvanut moninkertaiseksi. Toisaalta vasemmanpuoleisessa käyrässä esitetyn 2-fenoksietanolin emissio ei vaikuta olevan selkeästi liimakerroksen suhteellisesta kosteudesta riippuvainen, vaan mittaustulosten hajonta on edellistä laajempi. (10, s. 22) Tämä korostaa ilmiön monimutkaisuutta, eikä pelkkien olosuhteiden perusteella voida yksinkertaistaen päätellä kaikkien rakenteissa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden sekä syntyvien emissioiden käyttäytymistä, todennäköisyyttä tai voimakkuutta.



Kuva 8 Joustovinyylilaatoilla pinnoitetun rakenteen emissiot (2-fenoksietanoli vasemmalla, 2-etyyliheksanoli + n-butanoli oikealla) 4 viikon kuluttua maton asentamisesta (10, s. 22)

Emissiovauriotyyppin aiheuttajaa tutkittaessa on lähtökohtana primääri- ja sekundääriemissioiden erottaminen toisistaan. Vaurion aiheuttaja on useissa tapauksissa monen tekijän summa. Emissioita aiheuttavat kemialliset reaktiot voivat tapahtua itse pintamateriaalissa tai tämän ja betonirakenteen rajapinnassa, esimerkiksi liima- tai tasoitekerroksessa. Huonoin yhdistelmä on itsessään runsaasti emissioita aiheuttava kiinnitys- ja pintamateriaalipari yhdistettynä liian aikaisin tehtyyn asennukseen korkean rakennekosteuden omaavalle betonille.

3.5 Päällystämisen raja-arvojen määrittäminen ja tarkkuuden merkitys

Edellä esiteltyjen korkeasta pinnoittamishetken rakennekosteudesta johtuvien vauriotyyppien välttämiseksi alusbetonin kosteus tulee olla päällysteen asentamishetkellä riittävän alhainen. Tämä rakennekosteuden raja-arvo tulee saavuttaa ja varmentaa mittaamalla ennen pinnoitustyöhön ryhtymistä. Suhteelliselle kosteudelle määritellyt raja-arvot ovat paikoin kirjavia ja vaihtelevat suuresti eri julkaisuiden välillä. Viime kädessä kosteuden raja-arvon ilmoittaa pinnoitemateriaalin valmistaja. (1, s. 36-38)

Raja-arvon määrittäminen tulee erityisen vaativissa kohteissa lisäksi käydä erikseen läpi rakennesuunnittelijan tai erillisen kosteusteknisen asiantuntijan kanssa. Myös materiaalivalmistajien toimintatavat ovat paikoin vajavaisia ja pinnoituksen rajakosteus ilmoitetaan esimerkiksi pintakosteusmittarilla saatuihin tuloksiin perustuvaksi. Tällöin ratkaisut tulee käydä

projektikohtaisesti perusteellisesti läpi. Oheiseen taulukkoon 3 on kerätty eri lähteistä materiaalien pinnoitukselle alusbetonin suhteellisen kosteuden raja-arvoja.

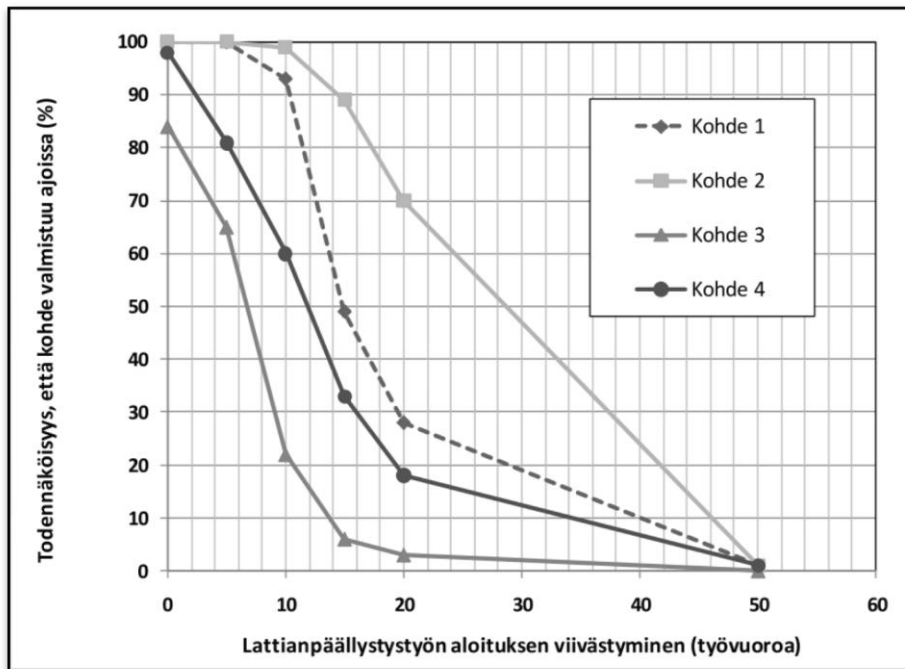
**Taulukko 3 Rakennekosteuden raja-arvot RH-% normaalille betonille arviointisyvyydellä sekä (pinna-
nassa). (15, 16, 17)**

Päällystemateriaali	SisäRYL 2013	BY 47 Betoni- rakentamisen laatuohjeet 2013	Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet 2007	Esimerkki- materiaalitoimittaja
Kelluva lautaparketti ja alusmateriaali	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	80 % [Parla Floor Oy]
Alustaan liimattava lautaparketti	85 % (75 %)	-	85 % (75 %)	80 % [Karelia-Upofloor Oy]
Mosaiikkiparketti	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	80 % [Karelia-Upofloor Oy]
Laminaatti ja vesihöyry- tiivis alusmateriaali	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % [Tarkett Oy]
Muovimatto	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % [Upofloor Oy]
Linoleum-matto	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	90 % [Forbo Flooring Oy]
Kumimatto	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % [Nora Flooring Oy]
Tekstiilimatto. tiivis / luonnonmateriaalia	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % (75 %)	85 % [Forbo Flooring Oy]
Tekstiilimatto, täyssynteettinen	90 % (75 %)	90 % (75 %)	90 % (75 %)	90 % [Tarkett Oy]
Muovi-, kumi- ja linoleum-laatat	90 % (75 %)	90 % (75 %)	90 % (75 %)	90 % [Forbo Flooring Oy]
Märkätilan vedeneriste	-	85 - 95 %	85-95 % (75 %)	85-90 % [Oy Sika Finland Ab]
Akryylipinnoitteet	97 %	-	-	97 % [Tikkurila Oy]
Polyuretaanipinnoitteet	90 %	-	-	90 % [Nanten Oy]
Liutteettomat epoksinpinnoitteet	97 %	-	-	97 % [Tikkurila Oy]
Vesiohenteiset epoksinpinnoitteet	97 %	-	-	97 % [Tikkurila Oy]

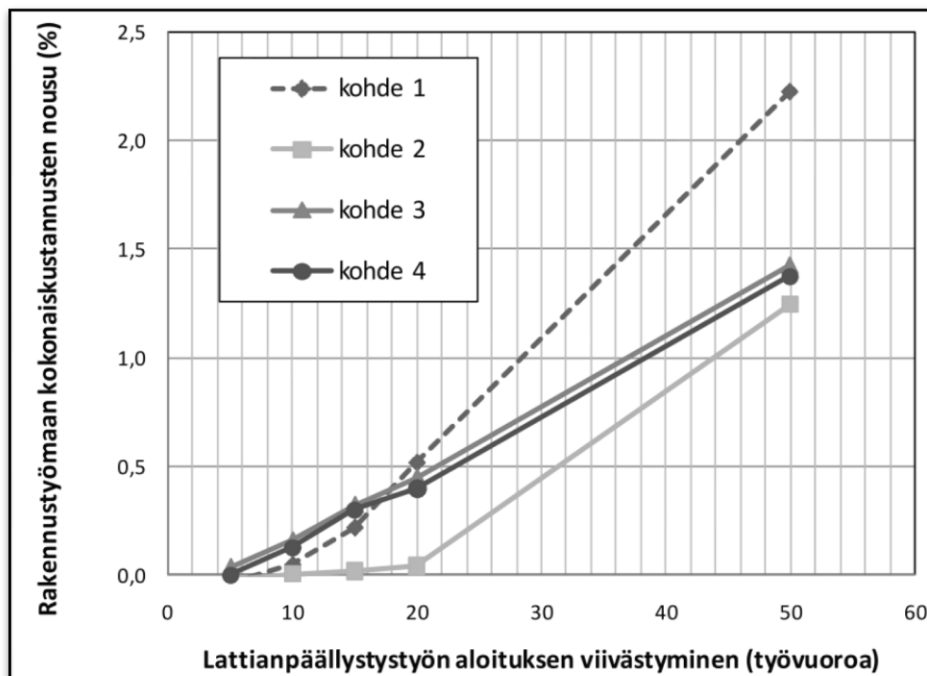
Taulukosta nähdään, että tapauskohtaisesti suositellut alustan suhteellisen kosteuden raja-arvot voivat lähteestä riippuen poiketa jopa kymmenen prosenttiyksikkö. Tämä voi kuivumisaikana mitattuna olla kymmeniä viikkoja. Rakennekosteuden kuivumisen tavoitearvon määrittäminen onkin tehtävä erityisen huolellisesti. Liian aikaisin tehty pinnoitus voi johtaa laatuongelmiin ja edellä esitettyihin vaurioihin. Toisaalta liian alhainen raja-arvo aiheuttaa työmaalla turhaa odotusta ja aikatauluviivettä ollen näin merkittävä kustannuserä sekä välittömästi pinnoitustöiden osalta että välillisesti myös pinnoitusta seuraaviin työvaiheisiin.

Tarja Merikallio on väitöskirjassaan vuonna 2009 käsitellyt lattianpinnoitustyön viivästymisen vaikutusta työmaan kokonaiskustannuksiin sekä kokonaisaikataulun saavuttamismahdollisuuksiin. Oheisissa kuvissa 9 ja 10 on esitetty tulokset neljälle eri tapaukselle, joista kohteessa nro 1 kyseessä on paikallavaletut lattiat, muissa elementtirakenteiset. Tutkimuksessa simulointi on tehty Monte-Carlo-menetelmää käyttäen. Viivästymisen syynä

voi virheellisesti määritellyn kosteusraja-arvon lisäksi olla epäonnistuminen rakenteen kuivattamisessa, virheellinen kosteusmittauksen suorittaminen ja tulosten tulkinta tai laaditun aikataulun lähtökohtainen epärealistisuus.(1, s. 1-3)



Kuva 9 Lattianpäällystystyksen viivästyksen vaikutus kohteen yleisaikataulun mukaiseen valmistumiseen (1, s. 2)



Kuva 10 Lattianpäällystystyksen viivästyksen vaikutus työmaan kokonaiskustannuksiin (1, s. 3)

Merikallion esittämien simulointien perusteella voidaan todeta, että pinnoituksen viivästyksen ollessa noin 10 viikon luokkaa alkavat kohteen aikataululliset riskit kasvaa merkittävästi. Tällöin tulisi aloittaa valmistautuminen aikataulun kiinnikirimiseen sekä tehostaa rakennekosteuden kuivattaminen maksimiinsa. Kustannusten nousun kannalta kriitti-

seksi nousee simulointien perusteella 20 viikon aikatauluviive. Kyseessä on tyypilliseen noin 1,5 vuoden rakentamisaikaan suhteutettuna merkittävät aikataulutekijät, muodostaen 13-25 % rakentamisajasta.

Päällystämiskosteuden raja-arvon tulisi olla perusteltu ja varmuudeltaan riittävä ilman, että työmaalla pinnoitusta joudutaan tarpeettomasti odottamaan. Kyseessä on siis aina kahden eri tavoitteen välinen kompromissi. Projektikohtaisesti voidaan painottaa eri osa-alueita eri tavalla esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoituksesta ja korjausmahdollisuuksista riippuen. Tavoitteen ollessa selkeä voidaan myös ennakoida tehokkaammin tarvittavat kuivatustoinimet. Samalla voidaan etsiä vaihtoehtoisia ratkaisuja, mikäli määritetyn tavoitekosteuden saavuttaminen ei kohtuullisilla kuivatuskeinoilla ole mahdollista rakentamisen aikataulun puitteissa. Kuten edellä esitetyt aikataulusimuloinnit osoittavat, on liian myöhäisessä vaiheessa havaittujen kuivumispoikkeamien korjaaminen aikataulullisesti lähes mahdotonta. Kuivumisen kehittymistä tuleekin seurata säännöllisesti rakennusvaipan sulkemisen ja kuivumisen käynnistymisen jälkeen.

4 Betonissa oleva kosteus ja kuivumisprosessi

4.1 Kosteus betonissa

Betoni on materiaalina huokoista ja on hygroskooppista. Se pyrkii jatkuvasti tasapainotilaan ympäröivän olosuhteen kanssa. Tämän monissa tapauksissa vuosikymmeniä kestävä prosessin aikana betoni sekä luovuttaa että ottaa vastaan kosteutta. Lopputilanteessa betonin suhteellinen kosteus asettuu ympäröivän ilmaolosuhteen tasolle.(1, s. 14) Vastaavasti betoni pyrkii tasapainokosteuteen myös siihen liitetyn materiaalin kanssa. Tämä on havaittavissa erityisesti paksujen ja lähtökohtaisesti vähän kosteutta sisältävien materiaalien, kuten puun, osalta.

Betonin kuivattamistoimilla pyritään poistamaan materiaalin huokosiin kerääntynyttä vettä mahdollisimman tehokkaasti. Valtaosa rakennusaikaisesta kosteudesta on peräisin betonin valmistusprosessista, jossa veden tehtävänä on yhdessä sementin kanssa käynnistää ja viädä läpi hydrataatioreaktio eli mahdollistaa betonin kovettuminen. Käytännössä vettä on betonimassassa aina enemmän kuin kyseinen prosessi teoreettisesti vaatisi johtuen ennen kaikkea massan työstettävyyden vaatimuksista. Materiaalin valmistusvaiheen lisäksi betoniin sitoutuvan veden lähteenä voivat lisäksi olla esimerkiksi maaperästä kulkeutuva tai ilmassa oleva kosteus. Tämä vesi kulkeutuu rakenteeseen joko nestemäisenä kapillaarisesti tai kaasulomuodossa diffuusion kautta. Ulkopuolisen kosteuslähteen osalta kriittistä on sen poistumisnopeus. Poistumisen tulee olla nopeampaa kuin kosteusrasituksen lisääntyminen, jotta rakenne ehtii palautumaan rasituksesta.(1, s. 11)

Hydrataation edetessä käytetty vesi sitoutuu betoniin sekä kemiallisesti että fysikaalisesti. Näistä kahdesta fysikaalisesti sitoutunut vesi on haihtumiskykyistä, kemiallisen veden ollessa osana pysyvää materiaalia. Tekijöiden suhde vaihtelee suuresti eri betonilaatujen välillä riippuen käytetystä sementtimäärästä ja massakohtaisesta hydrataatioasteesta.(1, s. 11) Kemiallisen veden sitoutuminen ja niin sanottu sitoutumiskuivuminen alkavat heti betonoinnin jälkeen kovettumisen alettua. Työmaaolosuhteissa tällä kuivumisella ei käytännössä ole vaikutusta koko rakenteen kosteustilaan muiden jälkihoidon ja sääolosuhteiden kosteuskuormitusten ollessa huomattavia. Kosteudenhallinnan näkökulmasta kuivuminen alkaa vasta rakenteen ollessa suojassa ulkopuolisilta kosteusrasituksilta.(1, s. 21)

Betonin rakennekosteuden kuivatustoimilla pyritään poistamaan nimenomaisesti fysikaalisesti sitoutunutta vettä. Se on betonin huokosrakenteessa joko huokosen pintaan sitoutuneena tai vesihöyrymuodossa huokosen ilmatilassa. Fysikaalisesti sitoutuneen kosteuden määrä voidaan esittää joko painoprosentteina (p-%) tai betonin tilavuuden suhteen määritettynä arvona (kg/m^3 tai g/m^3). Näiden lukuarvojen ja vallitsevan lämpöolosuhteen kautta voidaan määrittää betonin kuivattamisen ja rakenteen pinnoittamisen kannalta oleellinen betonin suhteellisen kosteuden lukuarvo. Tarkkaan ottaen tämä arvo on siis betonin huokostilan suhteellisen kosteuden arvo.(1, s. 13-14) Näin määritelty suhteellisen kosteuden arvo ei kuitenkaan ota huomioon määrittämisvaiheella huokosten pintaan sitoutuneena olevaa kosteutta, jonka määrä riippuu erityisesti rakenteesta vallitsevasta lämpötilasta.

Lämpötilan noustessa osa huokosen pintaan sitoutuneesta kosteudesta siirtyy huokosilmaan nostaa näin myös suhteellisen kosteuden arvoa. Lämpötilan laskemisella on puolestaan käänteinen vaikutus, ja kosteus sitoutuu ilmasta takaisin huokosen pintaan. Erityisen tärkeää on huomata ilmiön olevan käänteinen verrattuna vastaavaan muutokseen vapaan ilman tapauksessa. Tämän lämpötilasidonnaisen muutoksen perusteet on tärkeää tiedostaa myös työmaajärjestäjä ja kosteusmittauksia suorittavan tahon toimesta.(1, s. 16) Ilmiö tulee huomioda erityisesti hankkeessa tehtyjä rakenteen suhteellisen kosteuden mittaustuloksia arvioitaessa ja on osaltaan perustelu sille, että mittaukset tulisi aina suorittaa mahdollisimman lähellä rakenteen lopullista käyttölämpötilaa. Mittausvaikutusta on käsitelty tarkemmin tämän diplomityön kappaleessa 7.4.

Betonin kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden arvojen välinen riippuvuus vaihtelee suuresti eri betonilaatujen ja lämpötilojen välillä. Toisin sanoen kahdella eri betonilla voi mittauksen mukaan olla täysin sama suhteellisen kosteuden arvo, vaikka niiden absoluuttinen kosteusmäärä eroaisi suuresti. Myös kosteustilan muutossuunnalla on merkitystä tekojen verrannollisuuteen. Riippuvuudesta on kirjallisuudessa esitetty erilaisia tasapainokosteuskäyriä. Näitä käyriä tuli kuitenkin käyttää harkitusti ja ainoastaan suuntaa antavien tarkasteluiden laadinnan apuna.(1, s. 16)

4.2 Betonin kuivuminen

Betonimassan kuivuminen alkaa teoreettisella tasolla heti betonoinnin suorittamisen jälkeen, hydraatioreaktion ollessa käynnissä. Tällöin tapahtuvaa kemiallisen veden sitoutumista kutsutaan kemialliseksi kuivumiseksi tai sitoutumiskuivumiseksi. Kuivumisen kannalta optimaalisissa oloissa sen vaikutuksesta betonin suhteellisen kosteuden arvo laskee välillä 90–98 %. Sitoutumiskuivumisen voimakkuus riippuu erityisesti betonin vesi-sementti-suhteesta. Merkittävintä alkuvaiheen kuivuminen on alhaisen vesi-sementti-suhteen omaaville betoneille.(1, s. 21)

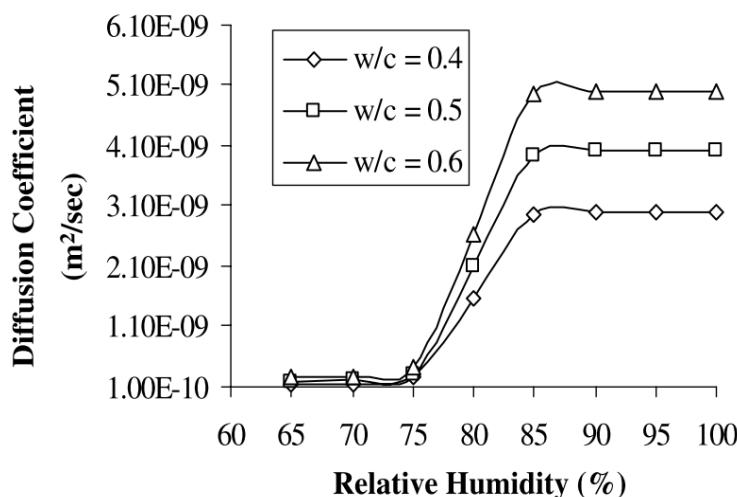
Varsinainen betonin huokosiin sitoutuneen fysikaalisen veden kuivuminen alkaa, kun rakenne on suojassa ulkopuolisilta kosteusrasituksilta. Ympäröivän ilman vesihöyryn osapaine ja pitoisuus ovat tällöin huokostilassa vallitsevia olosuhteita matalammat. Huokosis- sa oleva vapaa vesi alkaa kulkeutua rakenteesta kohti kuivempaa ilmaa ja rakennekosteuden kuivuminen alkaa. Kosteuden kulkema matka on olennaisin kuivumisaikaan vaikuttava tekijä. Tähän voidaan vaikuttaa rakenteen dimensioiden sekä kuivumissuuntien kautta. Kuivumisen tehokkuuteen vaikuttavat lisäksi betonin ominaisuudet, rakenteen lämpötila sekä työmaatoiminnan kannalta olennaisimpana vallitsevien kuivumisolosuhteiden optimaalisuus eli teoreettisesti vesihöyrynpaineen eron suuruus. Tämän paine-eron kasvaessa nopeutuu myös kuivuminen.

Kuivumisen alkuvaiheessa, betonipinnan ollessa silminnähden märkä kosteuden siirtyminen on runsasta ja tapahtuu pääosin kapillaarisesti. Tällöin betonin suhteellinen kosteus laskee varsinkin pintakerrosten osalta nopeasti. Varsinaisessa rakennekosteuden kuivatusprosessissa kapillaarisesti tapahtuvan kuivumisen osuus on kuitenkin ajallisesti lyhyt.(1, s. 22)

Kapillaarisen kuivumisen tapahduttua jatkuu kuivuminen täysin vesihöyryn diffuusiona. Samalla kosteusrintaman kulkema matka rakenteessa kasvaa ja kuivuminen hidastuu jatkuen aina tilan tai liittyvän rakenteen tasapainokosteuden saavuttamiseen saakka.(1, s. 22) Diffuusiona tapahtuva kuivuminen noudattaa Fickin toisena lakina tunnettua teoriaa, joka on esitetty oheisessa yhtälössä numero 1.(18, s. 676)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(P) * \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Yhtälössä muuttuja P on betonin suhteellinen kosteus. Suhteellisen kosteuden funktiona esitetty muuttuja λ puolestaan on rakenteesta riippuva diffuusiokerroin, joka riippuu betonin ominaisuuksista ja on kokeellisesti määritetty arvo. Oheisessa kuvassa 11 on esitetty Dublinin yliopiston tutkimuksessa määritettyjä diffuusiokertoimen arvoja eri betonilaaduille. (18, s. 676)



Kuva 11 Diffuusiokertoimen muutos betonin suhteellisen kosteuden suhteen kolmelle eri betonilaadulle. (18, s. 676)

Kuvassa esitetyllä tavalla Fickin yhtälön mukaisessa laskennassa diffuusiokerrointa voidaan pitää vakiona kuivumisen raja-arvoon RH = 80 % asti, jonka jälkeen se putoaa rajusti ollen jälleen vakio RH = 75 % arvosta alaspäin. Edellä esitetyssä tutkimustapauksessa kertoimen lasku on jopa 96-98 prosentin luokkaa. Käytännössä raja-arvona oleva suhteellinen kosteus saavutetaan dimensioiltaan tyypillisten rakenteiden pintaosissa muutamissa viikoissa kuivattamisen aloituksesta ja syvemmissä osissa aivan rakennusaikaisen kuivattamisen loppuvaiheessa. Liian aggressiivinen ja nopealla tahdilla tapahtuva kuivattaminen voi aiheuttaa diffuusiokertoimen äkillisen laskun ja kuivumisprosessin merkittävän hidastumisen tai pahimmassa tapauksessa pysähtymisen kokonaan. Kuvan 11 vertailukäyristä voidaan todeta edellä mainitun rajakosteuden lisäksi vesi-sementti-suhteen merkittävä vaikutus diffuusiokertoimeen ja näin ollen myös kuivumisajan pituuteen. Vesi-sementti-suhteen vaikutus tasaantuu betonin suhteellisen kosteuden ollessa alle 75 %.(18, s. 676)

Kuivumisen edetessä rakenteeseen muodostuu kosteusjakauma, jonka muoto riippuu kuivumisreittien lukumäärästä. Betonirakenteessa kuivin osa sijaitsee aina poikkileikkauksen pintakerroksissa. Yhteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa suhteellinen kosteus on korkein rakenteen poikkileikkauksen ääriarvossa. Kahteen suuntaan kuivavassa tapauksessa korkein kosteusarvo vallitsee poikkileikkauksen keskiosassa.(1, s. 24) Tähän teoriaan ja tehtyihin koemittauksiin perustuen on määritelty myös porareikämittauksen ohjeelliset tarkastelusyvytydet rakenteessa. Kahteen suuntaan kuivuvissa rakenteissa tarkastelupiste on 20 prosentin syvyydellä rakenteen kokonaispaksuudesta. Yhteen suuntaan kuivuvien poikkileikkausten osalta vastaava arvo on 40 prosenttia. Tarkastelupisteen suhteellinen kosteus kuvaa riittävällä tarkkuudella pinnoittamisen jälkeen betonin ja pintamateriaalin rajapinnan kosteustilaa. Samalla tulee otetuksi huomioon myös kuivaan betonirakenteeseen jäävä jäännöskosteus.(1, s. 25)

5 Betonirakenteen kuivumisen arviointi ja ennakointi

Rakenteen kuivumisaika-arvion perimmäisenä tarkoituksena on yleensä kunkin rakennusosan pinnoitus- ja päällystämistyön ajankohdan määrittäminen. Arvio laaditaan erityisesti betonirakenteille, tyypillisemmin massiivisille tai maanvastaisille rakenteille. Yleisin, lähes jokaisessa rakennuskohteessa eteen tuleva rakenne on maanvarainen alapohja ja tämän pinnoitus. Liian kostean rakenteen pinnoittaminen aiheuttaa merkittävän kosteus- ja homevaurioriskin lisäksi myös riskin pinnoitteen myöhemmälle vaurioitumiselle tai irtoamiselle. Toisaalta tarpeettoman pitkä kuivumisaika aiheuttaa työmaalla aikatauluviivettä sekä estää seuraavien työvaiheiden suorittamisen tehokkaasti. Tällöin riskinä ovat erityisesti taloudelliset tekijät ja kustannusten nousu. Näin ollen kuivumisaika-arvioiden tulisi olla tarkoin laaditut, välttämällä kuitenkin liiallista monien viikkojen aikatauluviivettä aiheuttavaa varmuutta.

Tässä diplomityössä esitellään kaksi eri menetelmää betonirakenteen kuivumisaika-arvion laadintaan. Kappaleessa 5.1 käydään läpi kuivumisaika-arvion laadinta suomalainen Betonikeskus Ry:n julkaisussa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi (19) mukaan. Toisena määritystapana kappaleessa 5.2 esitellään ruotsalaisessa Lundin Teknillisessä korkeakoulussa julkaistu menetelmä (20). Esitetyt menetelmät on valittu käsiteltäväksi niiden yksinkertaisuuden vuoksi. Menetelmiä voidaan käyttää vähäisillä lähtötiedoilla hankkeen alkuvaiheesta alkaen.

Kuivumisarvioita laatiessa ja niiden käyttämisessä tuotannon suunnitteluun on erityisen tärkeää tiedostaa, että kaikki arviomenetelmät ovat vain suuntaa antavia rakentamisen apuvälineitä. Arvioiden perusteella voidaan ennakoida ja suunnitella työmaan kosteudenhallinnan tarpeita sekä määrittää aikataulullisia lähtötietoja. Kunkin rakenteen todellinen tila ja pinnoitusedellytykset tulee aina varmistaa työmaalla asianmukaisin kosteusmittauksin. Kosteusmittauksia käsitellään tämän diplomityön kappaleessa 7.

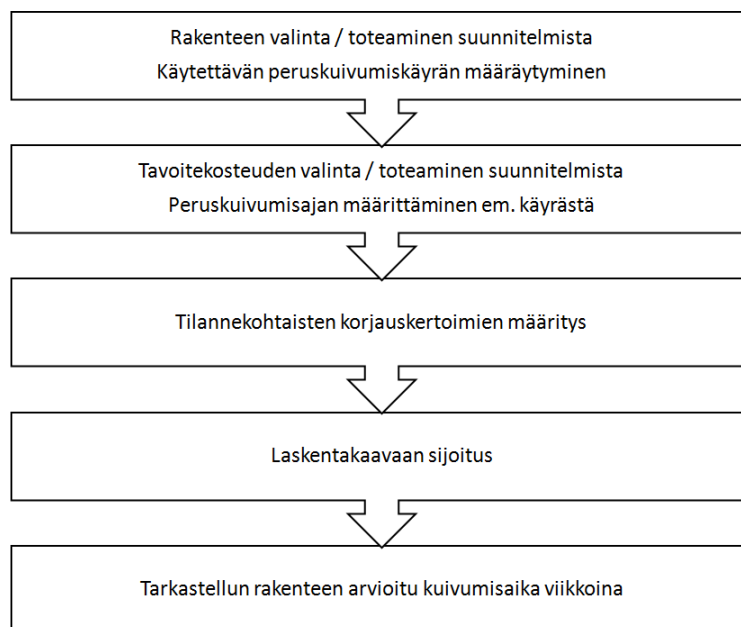
5.1 Betonin kuivumisen ennakoarviointitapa 1

Tarja Merikallion julkaisussa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi esitetään yksi tapa betonin kuivumisaikan määrittämiseen. Julkaisu on laadittu osana Tekninen betonirakentaminen TERA 2002 –projektia. Kyseinen arviointiohjeisto perustuu projektissa tehtyyn kirjallisuustutkimukseen sekä kosteudenhallintaan ja kosteusmittaukseen erikoistuneen yrityksen vuosien 1995-2001 välillä tekemiin tutkimuksiin ja mittauksiin.

(19, s. 3). Arviointimenetelmä perustuu siis pitkälti tehtyihin koerakenteisiin sekä erilaisissa kohteissa suoritettuihin kosteusmittauksiin.

Ohjeistuksessa kuivumisaika-arvion lähtötietona on kullekin rakenteelle määritetty peruskuivumiskäyrä. Rakenteet ovat yleisesti käytössä olevat perustyyppit: maanvastainen teräsbetoni-laatta, massiivinen teräsbetonirakenne (seinät sekä laatat ala-, väli- ja yläpohjissa), liittolaattarakenne, kuorilaattarakenne, ontelolaattavälipohja sekä kelluva pintabetoni-laatta (19, s. 38) Tässä diplomityössä on keskitytty paikallavalurungon osalta tyypillisiin rakenteisiin eli maanvastaisiin laattoihin sekä massiivisiin teräsbetonirakenteisiin.

Peruskuivumiskäyrästä saatava kuivumisaika viikkoina riippuu tapauskohtaisesti tavoiteltavasta betonin suhteellisesta kosteudesta. Saatua peruskuivumisaikaa muutetaan tämän jälkeen erinäisillä korjauskertoimilla, jotka voivat joko pidentää tai lyhentää peruskuivumiskäyrän mukaista kuivumisaikaa. Kuten peruskuivumiskäyrä, myös eri tekijöiden korjauskertoimien suuruus vaihtelee rakennetyyppien välillä. (19, s. 38) Kuivumisaika-arvion kulku on esitetty oheisessa kuvassa 12.



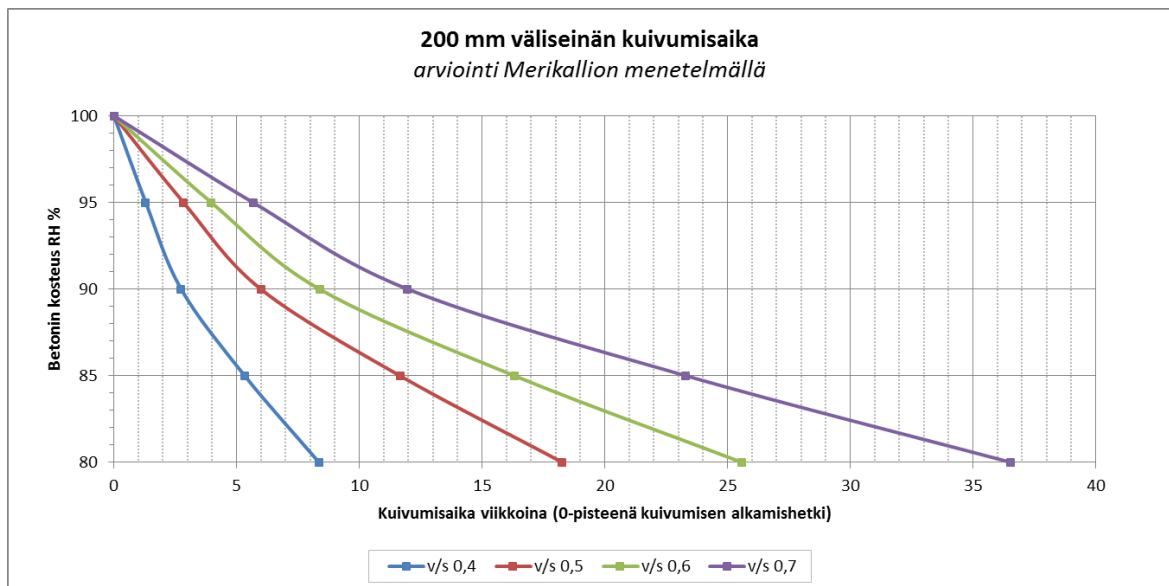
Kuva 12 Merikallion julkaisussa esitetyn kuivumisaika-arviomenettelyn kulku

Maanvastaisten laattojen sekä massiivisten teräsbetonirakenteiden osalta käytettävät korjauskertoimet ottavat huomioon seuraavassa listatut asiat. Kunkin tekijän perään on merkitty ominaisuuden muutoksen vaikutus kokonaiskuivumisaikaan.

- vesisideainesuhde; *kuivumisaika lyhenee vesisideainesuhteen pienetessä*
- rakenteen paksuus, *kuivumisaika pitenee rakennepaksuuden kasvaessa*
- alustan kosteus (maanvastaisen laatan tapauksessa); *märkä ja tiivis alusta pidentää kuivumisaikaa*
- kuivumissuunta (massiivisten teräsbetonirakenteiden osalta); *yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen kuivumisaika on vähintään kaksinkertainen kahteen suuntaan kuivuvaan verrattuna.*
- kastumisaika; *pitkään jatkunut altistuminen vedelle ja kosteudelle betonoinnin jälkeen pidentää kuivumisaikaa*
- kuivumisolosuhteet; *sisäilman kylmetessä ja suhteellisen kosteuden noustessa, kuivumisaika pitenee*

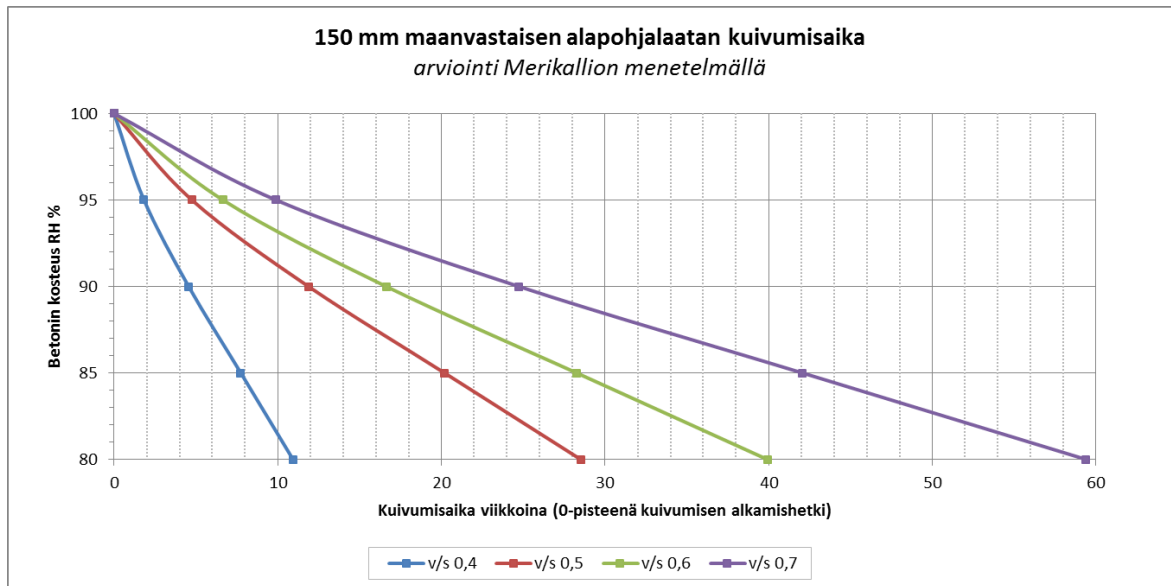
Liittolaatta- ja ontelolaattaväli- ja kuorilaattarakenteiden osalta kertoimet poikkeavat hieman edellä esitetyistä. Tällöin otetaan huomioon esimerkiksi ontelolaatan ja mahdollisten tasoitteiden kosteus. Kokonaan tai osittain tapahtuva yhteen suuntaan kuivuminen on otettu huomioon jo peruskuivumiskäyrässä. (19, s.39-57)

Merikallion julkaisussaan esittämä kuivumisen arviointimenetelmä perustuu siis kuivumisen eri tekijöiden huomioon ottamiseen kunkin rakenteen ja rakennuspaikan mukaisesti. Korjauskertoimet ovat luonnollisesti tekijöinä samat, jotka on jo todettu olevan kuivumissuunnittelun ja kosteudenhallinnan perusasioita. Oheisissa kuvissa 13 ja 14 on esitetty julkaisun ohjeiden mukaan laaditut kuivumisaika-arviot kahdelle eri paikalla valetulle rakennetyypille: 200 mm paksulle väliseinälle sekä 150 mm paksulle maanvastaiselle alapohjalla. Molemmissa tarkasteluissa lähtökohtana ovat vakiona pysyvät kuivumisolosuhteet (18 °C / RH 50 %) sekä rakenteen altistuminen vesisateelle yli kahden viikon ajan betonoinnin jälkeen. Kuivumisen ajallisena nollahetkenä pidetään kuivumisolosuhteiden saavuttamista eli käytännössä ajanhetkeä, jolloin rakenteen lisäkastuminen on estetty. Rakenteista väliseinä edustaa kahteen suuntaan kuivuvaa tapausta, alapohjalla yhteen suuntaan kuivuvaa tyyppiä. Muuttuvana tekijänä molempien rakenteiden osalta on vesi-sementti-suhde.



Kuva 13 Merikallion julkaisun mukaan laadittu kuivumisaika-arvio 200 mm paksulle paikallavaletulle väliseinälle.

Kahteen suuntaan kuivuvan väliseinän osalta kuivuminen tapahtuu tyypilliseen päällystämiskosteuteen RH 90 % suhteellisen nopealla tahdilla. Vesi-sementtisuhteen ollessa nykyrakentamiselle tyypillinen 0,5-0,6 kestää kuivuminen tällöin noin 6-9 viikkoa. Rajakosteuden madaltuessa kertaantuu myös vesi-sementti-suhteen vaikutus: 85 prosentin suhteellisessa kosteudessa ero betonityyppien välillä on kasvanut jo 5 viikkoon. Tyypillisessä puolitoista vuotta kestävässä rakennushankkeessa tämä tarkoittaa pahimmillaan 6 prosentin aikatauluviivettä, jonka kiinni kurominen tai valmistumisesta myöhästyminen ovat kustannusvaikutuksiltaan molemmat merkittäviä.



Kuva 14 Merikallion julkaisun mukaan laadittu kuivumisaika-arvio 150 mm paksulle paikallavaletulle maanvastaiselle alapohjalaatalle.

Kuvassa 14 esitetty maanvastaisen laatan kuivuminen myötäilee pääpiirteissään väliseinän kuivumistilannetta. Yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen osalta peruskäyrän mukainen kuivuminen itsessään on merkittävästi hitaampaa kahteen suuntaan kuivuvaan tapaukseen verrattuna. Samalla kuivumisen nopeuttaminen työmaalla tehtävin toimin on vaikeampaa, kun rakenteeseen voidaan vaikuttaa vain yhden tilan kautta. Erityisesti korostuvat rakenteelliset tekijät, kuten laatan paksuuden sekä betonimassan ominaisuuksien optimointi. Edellä esitetyt laskelmat löytyvät kokonaisuudessaan tämän diplomityön liitteestä 1.

Merikallion arviointitapa sopii hyvin työmaatason kosteudenhallinnan ja toteutusaikataulun laadinnan apuvälineeksi. Menetelmä on yksinkertainen ja nopea. Lisäksi se soveltuu monenlaisten rakenteiden tarkasteluun ja on sovellettavissa laajasti normaaleille betonirakenteille. Ohjeistus ei kuitenkaan kata erikoisrakenteita, kuten erityisen paksuja betonirakenteita. Näitä esiintyy usein vaativissa olosuhteissa ja usein yhteen suuntaan kuivuvina maanvastaisina rakenteina, esimerkiksi väestösuojissa sekä tutkimus- ja teollisuustiloissa. Paksujen rakenteiden osalta joudutaankin arvioimaan kuivumisaikaa rakennetta osittelemalla ja lisäkertoimia käyttämällä. Näiden osalta kuivumisaika-arviot tulisivat laatia erillisen kosteusteknisen erikoisasiantuntijan toimesta.

Merikallion julkaisun arviointitapaa erityisesti kuivumisolosuhteiden kannalta on käsitelty lisää tämän diplomityön kappaleessa 6.1. Työmaalla päivittäisen toiminnan kannalta tärkein kuivumista edistävä toimenpide onkin tehokkaiden kuivumisolosuhteiden ylläpito. Kuivumisolosuhteet sekä uudelleenkastumisen estäminen ovat toimenpiteitä, joilla edellä mainittuja kuivumisaikaa pidentäviä kertoimia voidaan pienentää ja kuivumista jopa nopeuttaa normaalitasoon verrattuna. Nämä ovat työmaatason päivittäisen toiminnan vaikutuksen alaisia seikkoja. Rakennepaksuuteen sekä betonin koostumukseen liittyvät asiat taas ovat arkkitehti- ja rakennesuunnittelun ja työnsuunnittelun vaikutuksessa olevia tekijöitä.

5.2 Betonin kuivumisen ennakoarviointitapa 2

Göran Hedenbladin julkaisussaan *Drying of Construction Water in Concrete* esittämä kuivumisaajan arviointimenetelmä on edellä esiteltyä Merikallion ohjeistusta yksinkertaisempi. Ohjeistuksessa kuivumisaika-arviot saadaan suoraan rakennekohtaisista käyrästä, jotka

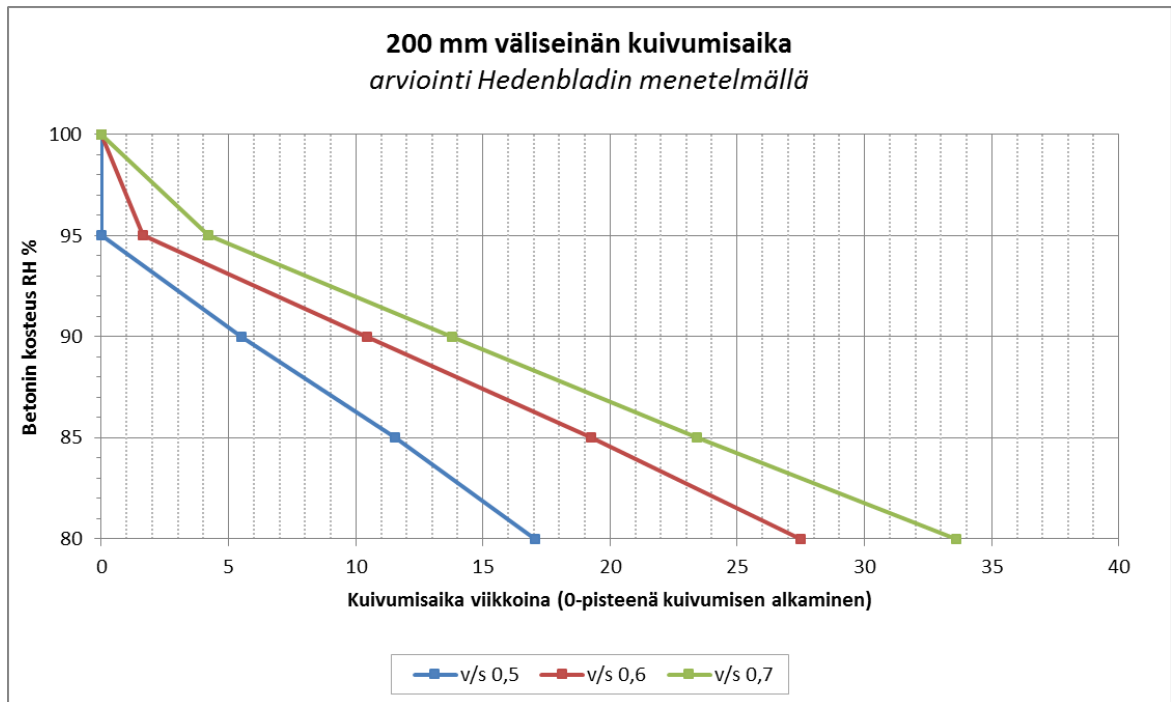
on jaoteltu paitsi vesisideainesuhteen, myös ympäristön olosuhteiden mukaan. Näin saatuja kuivumisaikoja voidaan korjata rakennepaksuuden mukaisilla kertoimilla. (20, s. 30) Kuivumiskäyrästöt on laadittu Lundin Teknillisessä korkeakoulussa usean vuoden aikana tehtyjen tutkimusten pohjalta. Kyseiset kuivumisen arviot on kuitenkin saatu pääosin laboratorio-olosuhteissa tehtyjen rakenteiden ja mittausjärjestelyiden kautta. (20, s. 3) Tämä sulkee osaltaan pois monta työmaaolosuhteisiin liittyvää tekijää, jotka ovat myös merkittäviä rakenteen kuivumiseen vaikuttavia osa-alueita. Samalla myös rakenteeseen vaikuttavat ympäröivien olosuhteiden vaihtelevuus ei välttämättä vastaa todellisuutta. Tätä voidaan pitää julkaisussa esitetyn kuivumisaikatarkastelun puutteena.

Julkaisussa kuivumistarkastelut on tehty normaalille, nopeasti kuivuvalle sekä itsetiivistyvälle betonille. Erilaisia jälkihoitotilanteita ja kuivumisen alkuvaihetta kuvaavia tilanteita tutkimuksessa on seitsemän:

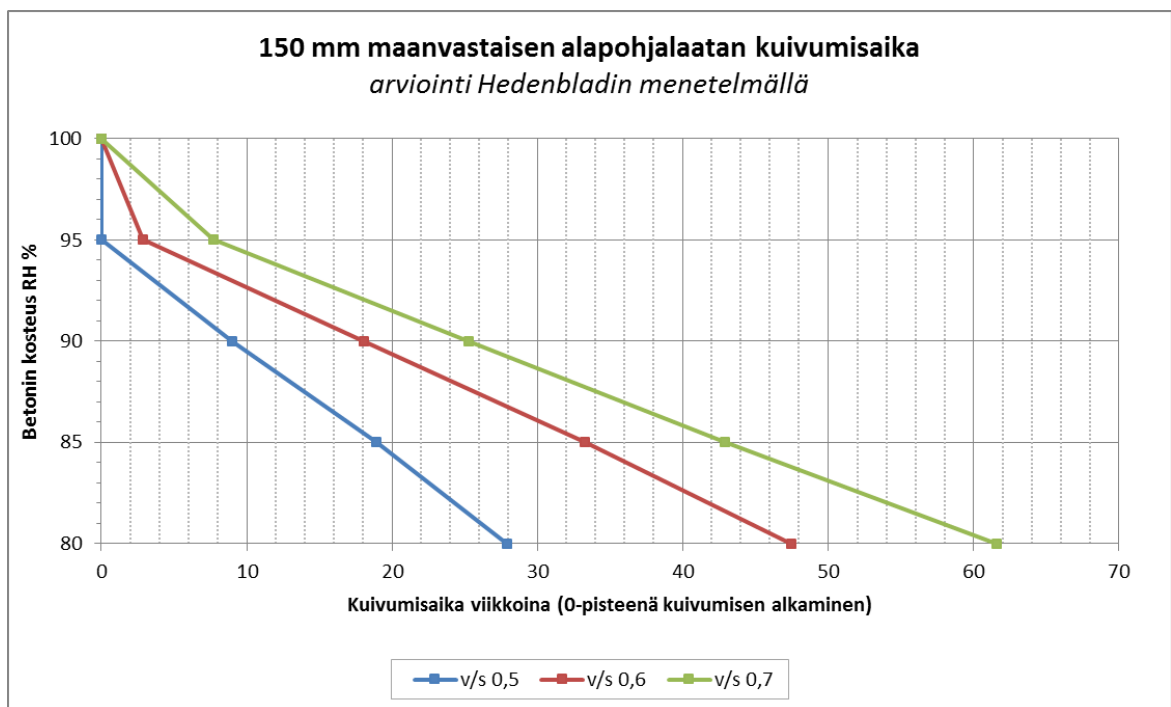
1. Betonoinnin jälkeen rakenne kaksi viikkoa sateessa, jonka jälkeen kaksi viikkoa kosteassa ympäristössä.
2. Betonoinnin jälkeen jälkihoito muotissa yhden vuorokauden ajan.
3. Betonoinnin jälkeen rakenne kaksi viikkoa jatkuvassa sateessa.
4. Betonoinnin jälkeen rakennetta ympäröivän ilman suhteellinen kosteus erityisen korkea.
5. Betonoinnin jälkeen rakenne jatkuvassa sateessa neljän viikon ajan.
6. Betonoinnin jälkeen rakenne kaksi kuukautta jatkuvassa vesisateessa.
7. Betonoinnin jälkeen rakenne vaihtelevissa oloissa jaksossa 2 viikkoa sateessa – 2 viikkoa kosteassa – 2 viikkoa sateessa.

Tutkimusjärjestelyissä 1. – 5. käytetty betonimassa oli normaalisti kovettuva betoni, jonka vesisideainesuhte vaihteli välillä 0,4 – 0,75. Tapaukset 6. ja 7. toistettiin korkealujuusbetonista ja itsetiivistyvistä betonista valmistetuille rakenteille, vesi-sementti-suhteen vaihdellessa välillä 0,33–0,49. (20, s.16-18). Näiden perustilanteiden pohjalta saatuja kuivumisaikoja korjataan kertoimilla vesi-sementti-suhteen, rakennepaksuuden sekä kuivumisolosuhteiden muuttuessa. Julkaisun mukaan tarkastelun epätarkkuus kasvaa sen mukaan mitä useampia korjauskertoimia joudutaan käyttämään. Käytännön tarkasteluissa, kuten tämän diplomityön case-esimerkissä näin joudutaan kuitenkin tekemään. Yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen osalta kuivumisaikaa tarkastellaan kaksinkertaistamalla laskelman rakennepaksuus, mikä osaltaan lisää tarkastelun epävarmuutta erityisesti rakennepaksuuskertoimen ekstrapoloinnista johtuen. (20, s.17-22)

Seuraavissa kuvissa 15 ja 16 on esitetty Hedenbladin julkaisun ohjeistuksen mukaan laaditut kuivumisarviot kappaletta 5.1 vastaavasti kahdelle rakenteelle: 200 mm paksu väliseinä sekä 150 mm vahvuinen maanvastainen alapohjalaatta. Tarkastelussa ainoana muuttuvana tekijänä on betonimassan vesi-sementtisuhde vaihdellen kolmen eri arvon välillä: 0,5; 0,6 sekä 0,7. Kuivumisolosuhteina tarkastelussa on käytetty vakio-oloja 18 °C / RH 60 %, jotka eroavat Merikallion julkaisun olosuhteista suhteellisen kosteuden osalta kymmenen prosenttiyksikköä. Ajallisena nollahetkenä on rakenteen lisäkastumisen päätyminen ja kuivumisen alkaminen. Laskelman kulku on esitetty tämän diplomityön liitteessä 2.



Kuva 15 Hedenbladin julkaisun mukaan laadittu kuivumisaika-arvio 200 mm paksulle paikallavaletulle väliseinälle.



Kuva 16 Hedenbladin julkaisun mukaan laadittu kuivumisaika-arvio 150 mm paksulle paikallavaletulle maanvastaiselle alapohjalaatalle.

Kahteen suuntaan kuivuvan väliseinän osalta Hedenbladin julkaisun mukainen tarkastelu tuottaa tulokseksi nopeasti tapahtuvan alkuvaiheen kuivumisen. Esimerkiksi 0,5 vesi-sementti-suhteen omaava betoni olisi heti nolлахetkellä suhteelliselta kosteudeltaan 95 prosenttia. Tarkastelun kautta saatu kuivumiskäyrä loivenee suuresti vesi-sementtisuhteen kasvaessa. Tyypillisen 90 prosentin päällystämisen rajakosteuden osalta tämä tarkoittaa 6-10 viikon kuivumisaikaeroja. Kuvassa 16 esitetty alapohjalaatan kuivumiskäyrä muodostetaan käyttämällä laskennassa paksuudeltaan kaksinkertaista rakennetta. Käytännössä tämä

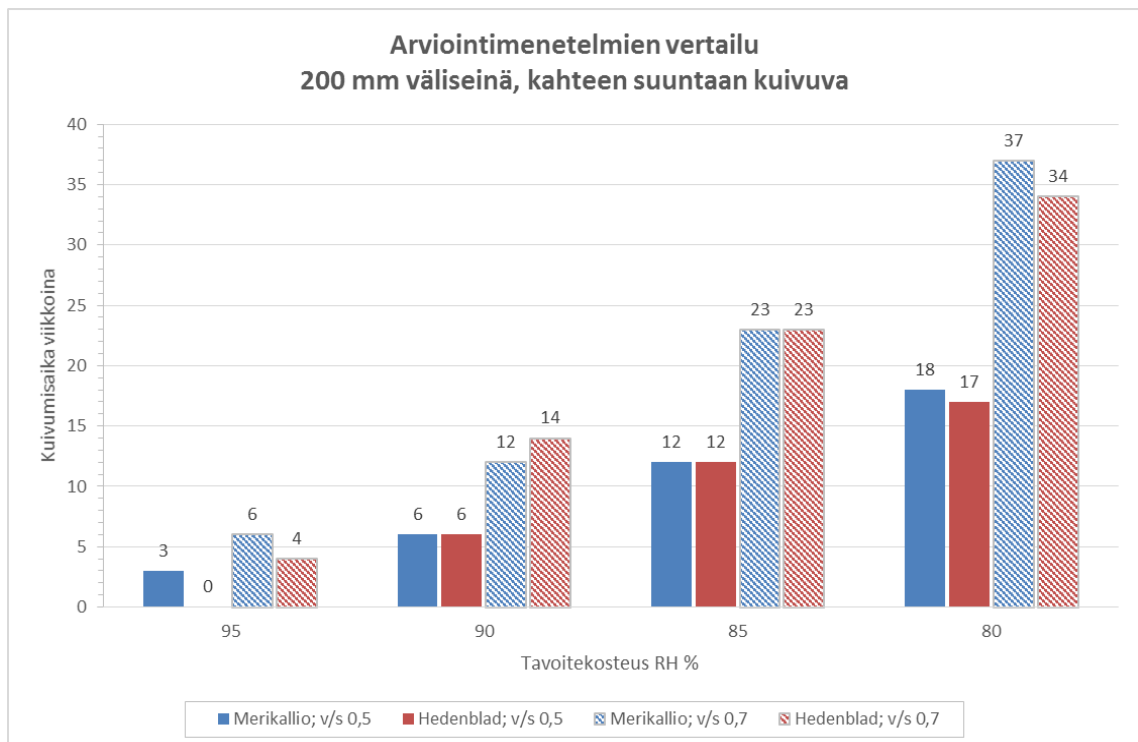
vaatii korjauskertoimien ekstrapoloimista 125 mm paksumpia rakenteita käsiteltäessä.(20, s. 21) Menetelmä ei ota yhteen suuntaan kuivuvaa rakennetta huomioon muissa korjauskertoimissa. Näin ollen esimerkkitarkastelussakin eri vesi-sementti-suhteen omaavat betonit asettuvat toisiinsa nähden suhteellisesti samaan asemaan kuin kahteen suuntaan kuivuvan rakenteen osalta.

Julkaisussaan Hedenblad käsittelee myös betonin lisäaineiden ja vaihtoehtoisten hienoinesten vaikutusta betonin kuivumisaikaan. Silikan käytöllä osana massan hienoinenosuutta todettiin olevan merkittävä vaikutus kuivumiseen. Esimerkiksi 180 mm paksun rakenteen osalta kulunut aika lähes puolittui, kun silikan määrä oli kymmenen prosenttia käytetystä sementtimäärästä. Lisäaineista tarkasteltiin tehonotkistimen vaikutusta, jonka todettiin olevan merkityksetön normaaliin kuivumiseen verrattuna.(20, s.19-20) Toki notkistimen käytöllä pystytään vähentämään tarvittavaa vesimäärää ja näin ollen pienentää massan vesihienoinenessuhdetta. Lisäaineet voivat tietyissä tapauksissa kuitenkin käyttäytyä kuivumisen kannalta arvaamattomasti ja niiden käytön on oltava tarkoin harkittua.

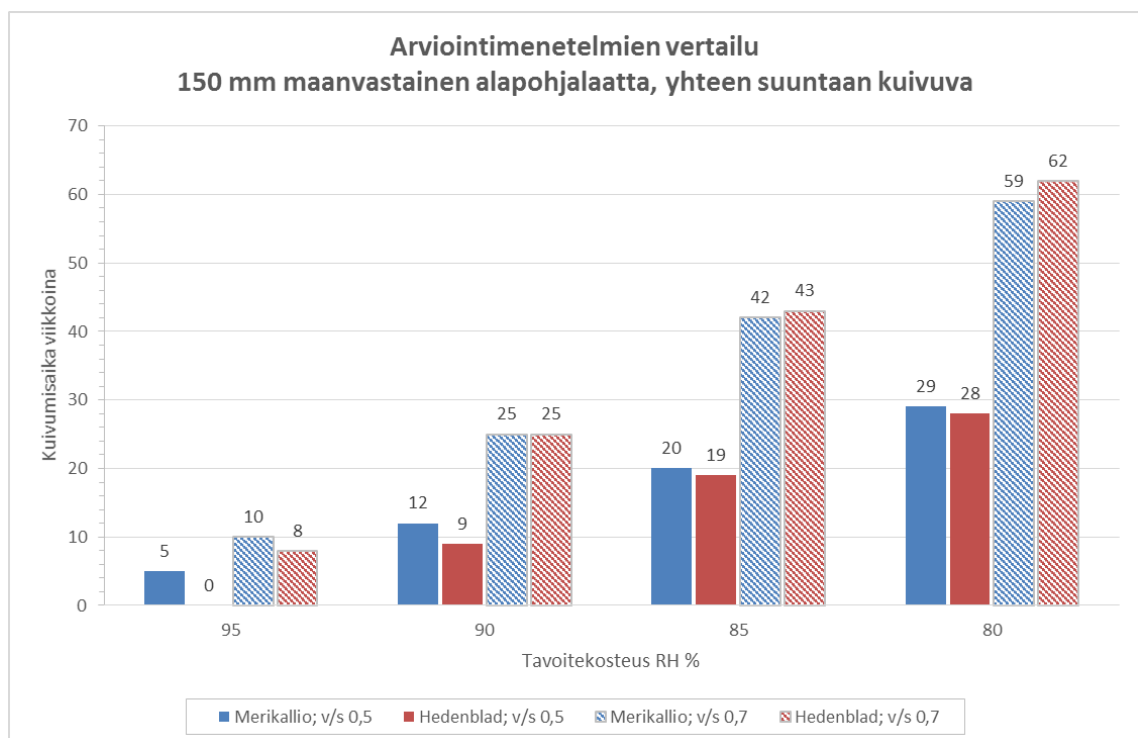
Hedenbladin esittämä arviointimenetelmä on pitkälle yksinkertaistettu, esimerkkirakenteisiin perustuva arviointitapa. Valmiit taulukot sopivat työmaalla suoritettavaan arviointiin hyvin, mutta niiden sovellettavuus projektikohtaisesti on heikko. Liian yksinkertaistettu kuivumisen käsittely voikin johtaa huolimattomaan eri olosuhde- ja rakennetekijöiden huomiointiin. Lisäksi arviointimenetelmän kattavuus eri tekijöiden suhteen on melko vähäinen. Korjauskertoimien määrä on rajallinen, mikä johtaa helposti ekstrapolointiin todellisia kuivumisolosuhteita ja rakennepaksuuksia käytettäessä. Korkean rakennekosteuden osalta tyypillisesti ongelmallisia yhteen suuntaan kuivuvia rakenteita on julkaisussa ja kuivumiskäyrien laadinnassa käsitelty melko vähän.

5.3 Kuivumisarviointitapojen vertailu

Kuten kahdesta edellisestä kappaleesta käy ilmi, molemmat esitetyt kuivumisarvioiden laadintatavat käyttävät hieman erilaisia lähtötietoja ja korjauskertoimia hyväkseen. Tästä huolimatta tätä diplomityötä varten laaditut arviot kahdelle esimerkkirakenteelle tuottavat lähestulkoon yhtenevät tulokset. Oheisissa kuvissa 17 ja 18 on esitetty aiemmin laaditut kuivumisaika-arviot samassa taulukossa 0,5 ja 0,7 vesi-sementti-suhteen omaaville betoneille.



Kuva 17 Merikallion ja Hedenbladin julkaisujen mukaisten kuivumisaika-arvioiden vertailu 200 mm paksun väliseinärakenteen osalta.



Kuva 18 Merikallion ja Hedenbladin julkaisujen mukaisten kuivumisaika-arvioiden vertailu 150 mm paksun maanvastaisen alapohjalaatan osalta.

Kahdella eri menetelmällä saadut kuivumisaika-arviot eroavat toisistaan minimaalisesti ollen suurimmillaan vain kolme viikkoa. Käytännössä ero on niin pieni, ettei sillä ole työmaan kuivatussuunnittelun kannalta merkitystä. Saavutetulla tarkkuudella voidaan mainiosti suorittaa työmaan aikataulutus pinnoitustöiden osalta kummalla tahansa esitetystä

menetelmistä. Muutaman viikon pidennys kuivumisaikaan voi tapahtua pelkästään kuivumisolosuhteiden poikkeamilla esimerkiksi poikkeuksellisten sääolosuhteiden seurauksena.

Huomionarvoista vertailussa on Hedenbladin julkaisun esittämä melko alhainen rakenteen nollahetken kosteus, joka on esimerkiksi 0,5 vesi-sementti-suhteen tapauksessa jopa 95 prosentin luokkaa. Esitetty vertailu osoittaa osaltaan samalla, että normaaleille rakenneratkaisuille ja betonimassoille kuivuminen on ennakoitavissa melko helposti ja erot ovat ainakin tutkimusolosuhteissa pieniä. Ennakkoarvointiin haasteen aiheuttavat erikoisrakenteet, kuten dimensioiltaan massiiviset paikallavalukohteet. Kuivumisaika-arvioita tulee menetelmästä riippumatta käyttää työmaalla vain aikataulu- ja työsuunnittelun sekä kuivumisen seurannan tukena. Lopulliset rakenteen pinnoituspäätökset tulee aina perustua rakenteesta tehtyihin asianmukaisiin kosteusmittauksiin.

6 Kuivumisen varmistaminen työmaan olosuhteiden hallinnalla

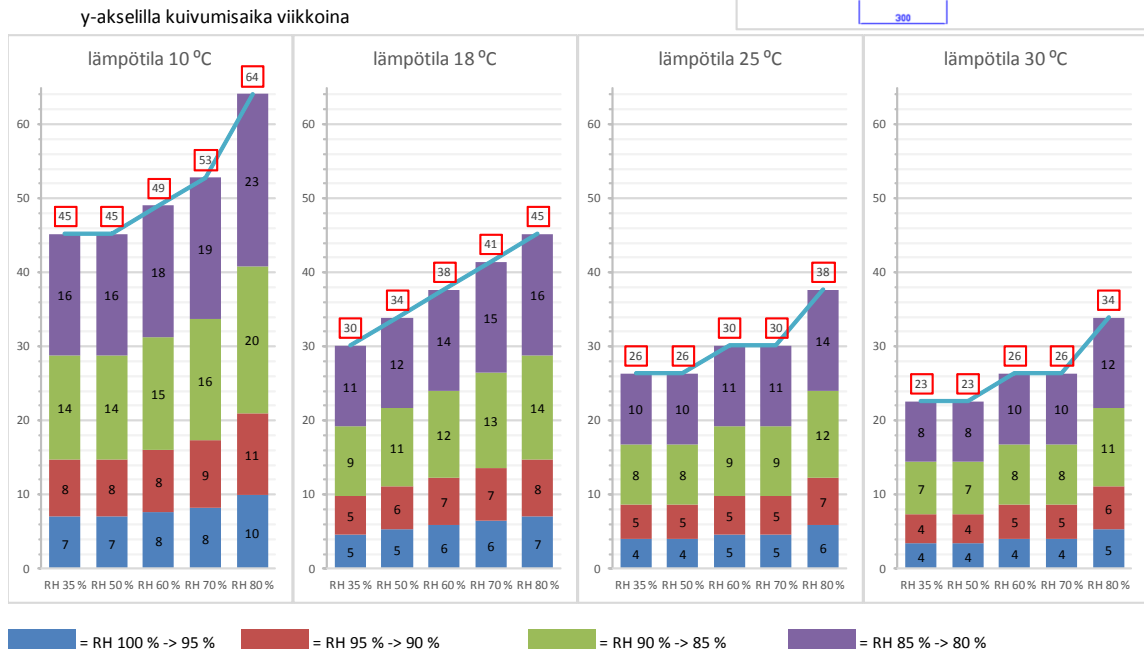
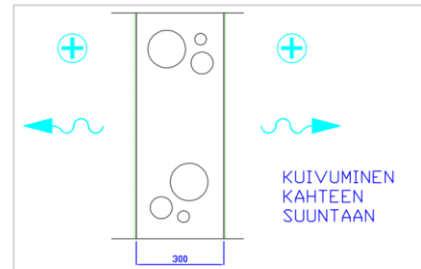
6.1 Olosuhteiden merkitys rakenteen kuivumisessa

Kuivumisolosuhteiden hallinta on merkittävin työmaan päivittäisen toiminnan tekijä, joka vaikuttaa rakenteen kuivumisnopeuteen. Teoreettisesti kuivuminen on tehokkainta tiloissa, joissa lämpötila on korkea ja ilman kosteuspitoisuus pieni. Todellisuudessa olosuhdehallinnassa on aina otettava huomioon useita tekijöitä kustannusvaikutuksista työtekniisiin lähtökohtiin saakka.

Oheisessa kuvassa 19 on esitetty rakennepaksuudeltaan 300 mm paikallavaluväliseinän kuivumisaika eri olosuhteissa käyttäen Merikallion julkaisun kuivumisaika-arviointiohjetta.(19, s.41) Tarkastelussa kuivumisolosuhteet vaihtelevat kosteasta ja kylmästä (10 °C, RH 80 %), lämpimään ja kuivaan olosuhteeseen (30 °C, RH 35 %). Tähän tarkasteluun valittiin Merikallion julkaisema menetelmä sen monipuolisuuden sekä käytön yleisyyden vuoksi. Muilla menetelmillä saadut tulokset noudattavat samoja periaatteita: kuivuminen hidastuu rakennetta ympäröivän ilman lämpötilan laskiessa ja suhteellisen kosteuden noustessa.

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrästä kuivumisajat RH-arvoihin 95, 90, 85 ja 80 %
- vesi/sideaine-suhde 0,5, rakennepaksuus 300 mm
- kahteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen kosteassa yli 2 viikkoa



Kuva 19 Kuivumisaika-arvio 300 mm paksulle kahteen suuntaan kuivuvalle väliseinälle eri olosuhteissa.

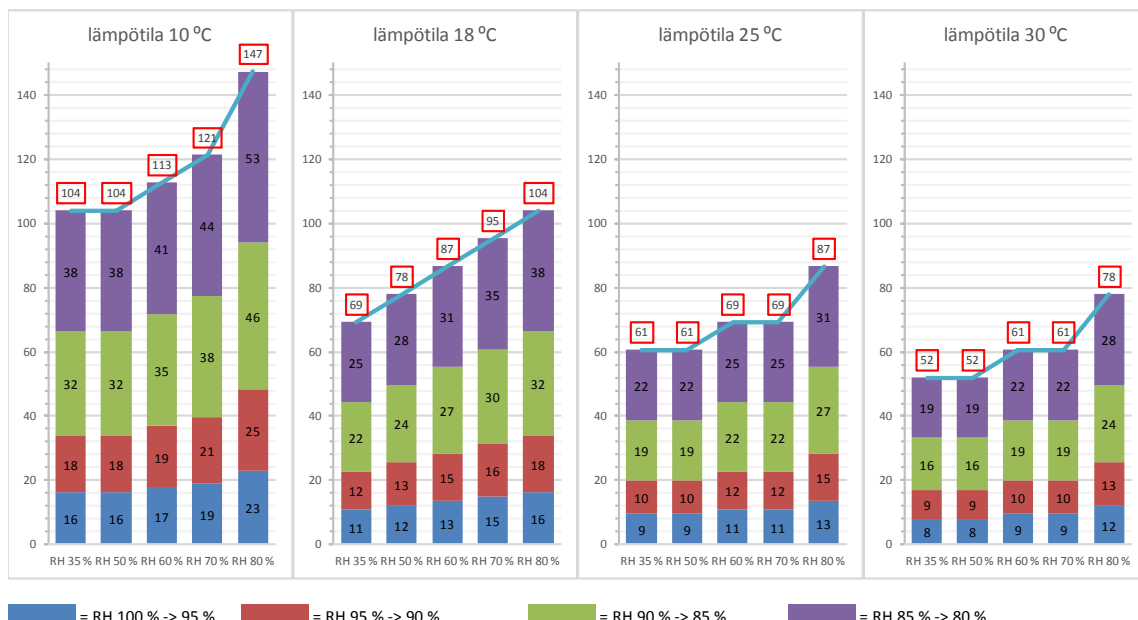
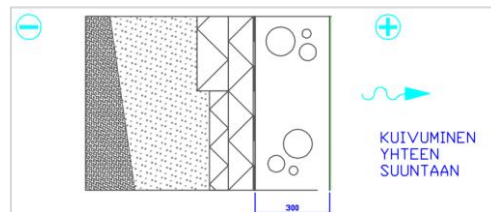
Kuvaajista nähdään kuivumisajan voimakas riippuvuus ympäröivän tilan olosuhteista. Ensiarvoisen tärkeää on pitää ilman lämpötila lähelle kahtakymmentä celsiusastetta. Esimerkitarkastelussa pelkästään lämpötilan nosto kymmenestä asteesta kahdeksaantoista lyhensi verrattain normaalissa ilmakehässä kokonaiskuivumisaikaa 10-20 viikkoa. Pinnoituksen kannalta yleisen betonin 90 % suhteellisen rajakosteuden osalta vastaava aikaero on 4-6 viikkoa. Kuivumisaika lyhenee siis suhteessa kymmeniä prosentteja. Lämpötilan ollessa riittävän korkea voidaan tilannekohtaisesti vähentää ilman kosteuspitoisuutta.

Kuivumisolosuhteita arvioitaessa tulisi ennen kaikkea keskittyä siihen, että sisäilman on mahdollista vastaanottaa mahdollisimman suuri määrä rakenteesta tilaan kulkeutuvaa kosteutta. Tämä käy ilmi ainoastaan tarkastellessa sekä ilman lämpötilaa että suhteellista kosteutta toisistaan riippuvaisina suureina. Esimerkitarkastelun perusteella voidaan todeta, että suhteellisesti suurin hyöty saadaan lämpötilan nostolla noin kahteenkymmeneen asteeseen. Tätä korkeammat lämpötilat toki nopeuttavat kuivumista, mutta saavutettava hyöty on monissa tapauksissa vaadittuun lämmitystehoon suhteutettuna melko pieni. Ympäröivän tilan suhteellisen kosteuden osalta vastaavana raja-arvona voidaan pitää 50 %.

Oheisessa kuvassa 20 on esitetty vastaavalla tavalla 300 mm paksu seinärakenne tapauksessa, jossa kuivumista pääsee tapahtumaan vain yhteen suuntaan. Tämän kaltaiset tilanteet ovat tyypillisiä maanvastaisten seinien kohdalla tai tapauksissa, joissa toinen puoli rakennetta on jo pinnoitettu kosteutta läpäisemättömällä materiaalilla.

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrästä kuivumisajat RH-arvoihin 95, 90, 85 ja 80 %
- vesi/sideaine-suhde 0,5, rakennepaksuus 300 mm
- yhteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen kosteassa yli 2 viikkoa



Kuva 20 Kuivumisaika-arvio 300 mm paksulle yhteen suuntaan kuivuvalle kellarin seinälle eri olosuhteissa.

Kahteen suuntaan kuivuvan rakenteeseen verrattuna kuvaajan 20 tapauksessa kuivamisolosuhteilla on vielä merkittävämpi vaikutus kokonaiskuivumisaikaan. Esimerkiksi ilman suhteellisen kosteuden ollessa 50 % voidaan lämpötilan nostolla kymmenestä celsiusasteesta kahdeksaentoista saavuttaa 26 viikon nopeutuminen kokonaiskuivumisaikaan sekä 90 prosentin pinnoituskosteuteen 11 viikon aikasäästö. Erityistoimin voidaan kuivumisaikaa lyhentää vielä enemmänkin. Tämän kokoluokan aikajaksot ovat nykyisissä rakentamisprojektien aikatauluissa merkittäviä tekijöitä sekä kokonaisaikataulua rytmittäviä lähtötietoja. Yläpuolisen kuvaajan 20 osalta kuivumista merkittävästi nopeuttavat olosuhdetekijät ovat yhtenevät kahteen suuntaan kuivuvan rakenteen kanssa.

Edellä esitettyjen kuvaajien perusteella voidaan todeta myös kuivumissuunnalla olevan erittäin suuri merkitys rakenteen kokonaiskuivumisaikaan. Merikallion julkaisun mukaan kuivumisen yksisuuntaisuuden hidastava vaikutus on sitä suurempi mitä suurempi on käytetyn betonin vesisideainesuhde. Tällöin kuivumissuunnan korjauskerroin vaihtelee 2,0:n ($v/s = 0,4$) ja 3,2:n ($v/s = 0,7$) välillä. (19, s. 41) Betonin ominaisuuksien optimointi ja vesisideainesuhteen suuruus korostuvat siis erityisesti maanvastaisten rakenteiden kohdalla. Ylimääräisen veden poistuminen kestää korkean vesisideainesuhteen omaavasta rakenteesta yli puolet kauemmin kuin matalan v/s -arvon omaavasta betonista. Käytännössä betonimassan ominaisuudet valitaan eri osa-alueiden, kuten työstettävyyden, rasituskestävyyden ja lujuuden välisenä kompromissina. Luonnollisesti useimmissa tapauksissa rakenteen lujuuteen ja vakauteen liittyvät ominaisuudet ovat ensisijaisia valintaperusteita. Osa-alueiden painottumisen jakautuminen on tärkeää tiedostaa läpi rakentamisen ketjun sekä varmistaa,

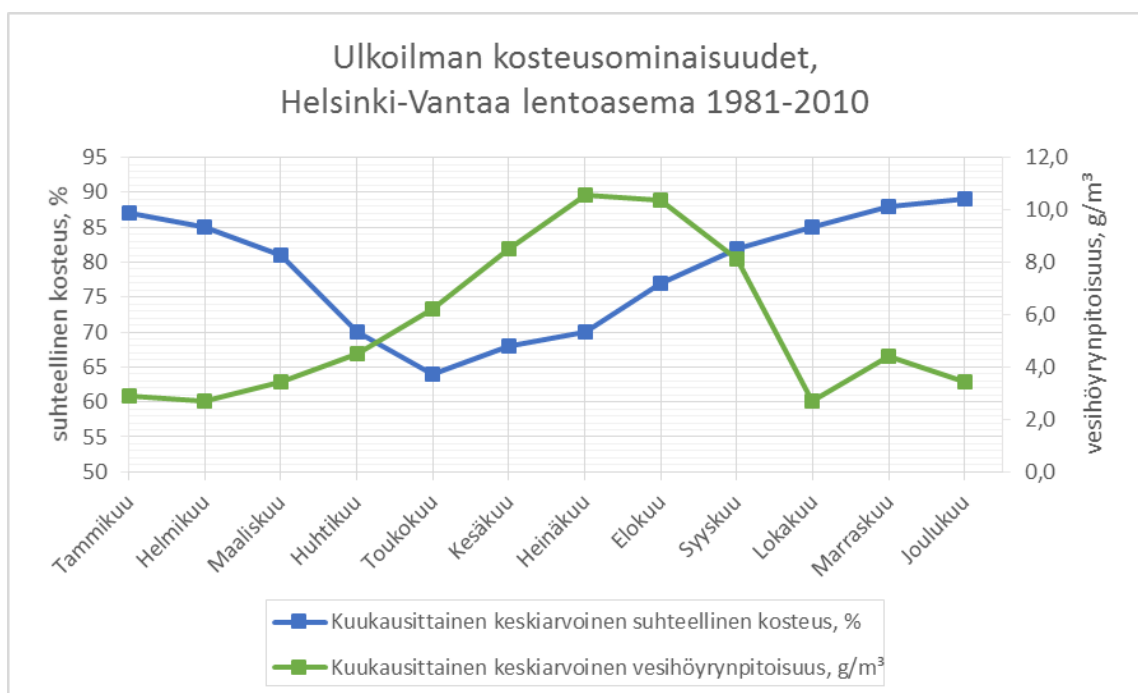
että lähtökohdat ovat kaikissa työn suunnittelun vaiheissa osapuolten tiedossa. Kuvien 19 ja 20 perustana olevat laskelmat on esitetty liitteessä 3.

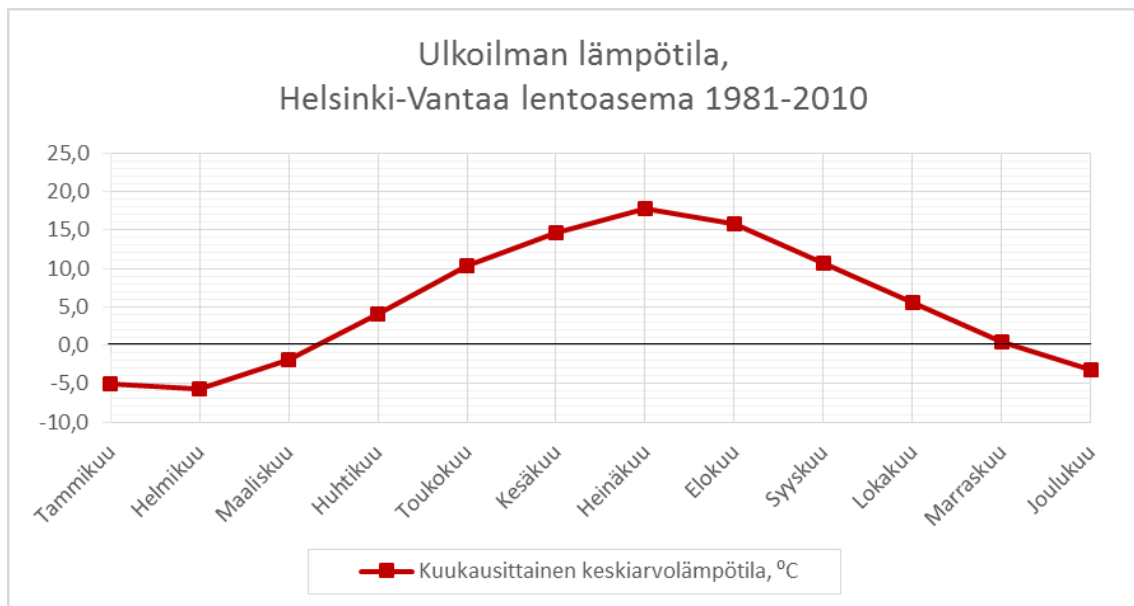
6.2 Kuivumisolosuhteiden määrittäminen ja ylläpito

Kuten edellisissä kappaleissa on esitetty, muodostaa betonirakenteiden kuivuminen merkittävän aikatauluttavan tekijän rakennusprojektissa. Kuivumisaikoja voidaan kuitenkin ohjata ja lyhentää huolellisella työmaan olosuhdehallinnalla. Kuivattamisen tulisi olla suunnitelmallista ja harkittua jokaiselle rakennusosalle ja lohkolle erikseen. Erityistapauksissa, esimerkiksi massiivisten paikallavalurakenteiden kohdalla, kuivatus tulee suunnitella jopa tilakohtaisesti. Ylipäätään tulee kuivattamisessa ottaa huomioon kunkin rakennuksen, rakenteen ja rakennuspaikan erityispiirteet. Betonirakenteiden osalta tämä tarkoittaa erityisesti kuivumissuunnan, dimensioiden sekä tulevien pinnoitteiden huomioimista. (21, s. 9) Monissa tapauksissa näihin tekijöihin ei enää suunnittelu- ja hankintavaiheiden jälkeen voida työmaan päivittäisessä toiminnassa vaikuttamaan. Tällöin korostuukin kuivatusolosuhteiden optimointi.

Kuivatuksen edellytyksenä ovat hallitut työmaaolosuhteet, erityisesti kuivatettavan rakenteen rajaaman sisätilan olosuhde. Tämä tarkoittaa käytännössä ilman lämpötilan sekä kosteustilan hallintaa. Rakennetta ympäröivän ilman tulee kyetä vastaanottamaan rakennusmateriaalista kulkeutuva kosteus. Yksinkertaistaen kyse on kostean ilman poistamisesta tilasta sekä sen korvaamista mahdollisimman vähän kosteutta sisältävällä ilmalla.

Kriittiseksi tekijäksi nousee käytettävän korvausilman ominaisuudet. Se on yleensä varsinakin uudishankkeissa ulkoilmaa. Joissakin tapauksissa korvausilman lähteenä voivat olla myös viereiset tilat, etenkin tilanteissa, joissa ilmanvaihto on hallitsematonta tai esimerkiksi ulkoseinien avoimet aukot on ummistettu liian laajalti. Korvausilman lähteen valinta ja ilman mahdollinen lämmitys- tai kuivatustoimenpiteet ovat tilanteesta ja vuodenajasta riippuvaisia, kuten oheisista kuvassa 21 olevista ulkoilman ominaisuuksista kuukausittain esitävistä kuvaajista voidaan todeta. Tiedot perustuvat Ilmatieteenlaitoksen mittaustietoihin Helsinki-Vantaan lentoaseman havaintoasemalla vuosien 1981-2010 välisenä aikana. (22)



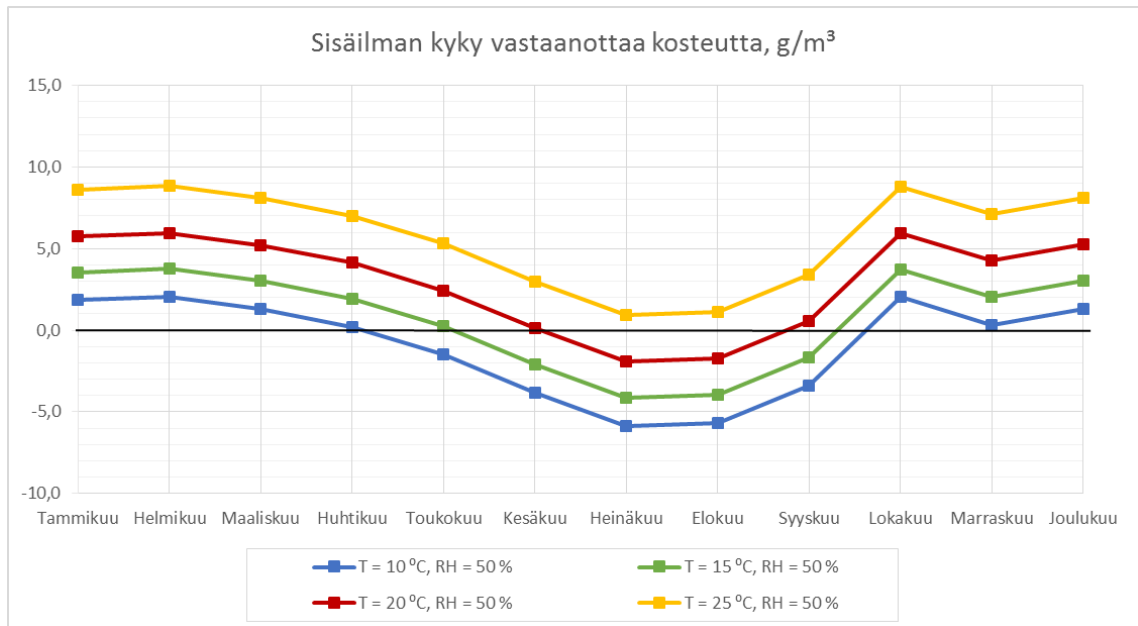


Kuva 21 Helsinki-Vantaan lentoaseman ilmastotiedot aikaväliltä 1981-2010 (22)

Rakenteen kuivatuksessa käytettävää ilmaa tulee aina tarkastella sekä lämpötilan että kosteuspitoisuuden kannalta. Pelkkä sisäilman alhainen suhteellinen kosteusprosentti ei takaa kuivatuksen tehokkuutta, vaan tarkastelun kohteena tulee olla erityisesti ilman sisältämä kosteus ja samalla kyky vastaanottaa lisää kosteutta. (21, s. 9) Kuten oheisista säätilaa kuvaavista taulukoista voidaan todeta, on ulkoilman kosteuspitoisuus korkeimmillaan kesäkuukausina ja pienimmillään talviaikaan. Keskimääräisen suhteellisen kosteuden pysyessä 60-90 prosentin välillä, vaihtelee kosteuspitoisuus huomattavasti suuremmalla vaihteluvälillä ollessa 2,5-10 g/m³. (22, s.22-23)

Korvausilman ominaisuudet määräävät kuivatettavassa tilassa tehtävät toimenpiteet. Yksinkertaistaen voidaan todeta, että kuivatusta varten kylmää ja kuivaa ilmaa tulee lämmitellä, kun taas lämpimän ja kostean ilman osalta toimenpiteenä on ilman kuivattaminen. Samalla ulkoilman ollessa kylmempää ja kuivempaa voidaan myös ilmanvaihdon määrää pienentää. Kyseessä on kompromissi eri tekijöiden välillä. Voidaankin todeta, että työmaan kuivatuskeinot seuraavat vuodenaikojen ja sääolojen vaihtelua. Tehtävien lämmitys- ja kuivatustoimien tulee olla tilannekohtaisia suhteuttaen myös kustannusten ja saavutettavan hyödyn suhteeseen.

Oheisessa kuvan 22 käyrästä esitetään kuivatettavan tilan sisäilman kyky vastaanottaa rakenteesta siirtyvää kosteutta neljässä eri lämpötilassa. Saatua lukuarvoa on ilmaan niin sanotusti mahtuvan kosteuden määrä, yksikkönään g/m³. Tarkastelussa sisäilman suhteellisenä kosteutena on pidetty betonin kuivumisen kannalta kohtuullista 50 prosenttia. Korvausilman lähteenä toimivan ulkoilman olosuhteina on käytetty edellä esitettyjä Helsinki-Vantaan lentoaseman tietoja. Tarkastelun laskentaperusteet on esitetty tämän diplomityön liitteessä 4.



Kuva 22 Kuivatettavan tilan sisäilman kyky vastaanottaa tilassa olevaa lisäkosteutta. Käyrästä laadittu perustuen Helsinki-Vantaan lentoaseman säätilastoihin.

Kuvaajasta nähdään, että esimerkkitapauksessa sisäilma ei kesäkuun ja syyskuun välisenä aikana pysty vastaanottamaan lainkaan lisäkosteutta ellei korvausilmaa kuivateta erikseen koneellisesti. Tarkastelussa saadut lukuarvot osoittavat, että rakennekosteuden kuivattamisen kannalta haasteellisimmat ja tehottomimmat ajat ovat juuri kesä ja alkusyksy. Tällöin korvausilmana käytettävä ulkoilma sisältää suuren määrän kosteutta, vaikka sen suhteellinen kosteus ei talviajan arvoista juuri eroa tai ovat jopa pienempiä. Tarkastelun perusteella voitaisiin tehdä myös virheellinen johtopäätös siitä, että paras sisäilman olosuhde on mahdollisimman korkean suhteellisen kosteuden omaava ilma, johon ”mahtuva” kosteuden määrä olisi mahdollisimman suuri. Näin ei kuitenkaan voida toimia, vaan ylläpidettävät sisäilman olosuhteet on valittava betonin kuivumisen kannalta optimaalisiksi. Kuten aiemmin tässä diplomityössä on todettu tarkoittaa tämä esimerkiksi Merikallion julkaisun mukaan korkeimmillaan 50 prosentin suhteellista kosteutta. (19, s. 41)

Edellä esitettyihin esimerkkitarkasteluihin perustuen sisäilman koneellinen kuivattaminen tulisi aloittaa siinä vaiheessa, kun sen kyky vastaanottaa kosteutta muuttuu negatiiviseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa ulkoilman olosuhteisiin peilaten kesälle ja alkusyksyyn sijoitettava ajanjaksoa. Työmaan tilanteesta riippuen ilmankuivattamista voidaan tarvita muinaikin aikoina esimerkiksi paljon kosteutta tuottavan työvaiheen ollessa käynnissä.

Työmaan kuivumisolosuhteiden hallinnan pääkohdat ovat lisäkosteuden kertymisen ja kastumisen estäminen, riittävän lämpötilan varmistaminen sekä riittävän ilmanvaihdon ja tarvittaessa ilmankuivattamisen toteuttaminen. Tämän prosessin onnistumisen perusta on työmaan vaiheistuksessa ja lopullisten rakenteiden tehokkaassa käytössä yhdessä väliaikaisten keinojen kanssa. Käytännön tasolla olosuhteiden ylläpidon keinoja on esitetty tämän diplomityön case-kohdetta käsiteltäessä, kappaleessa 8.

7 Rakenteen kosteustilan todentaminen ja pinnoitettavuuden arviointi

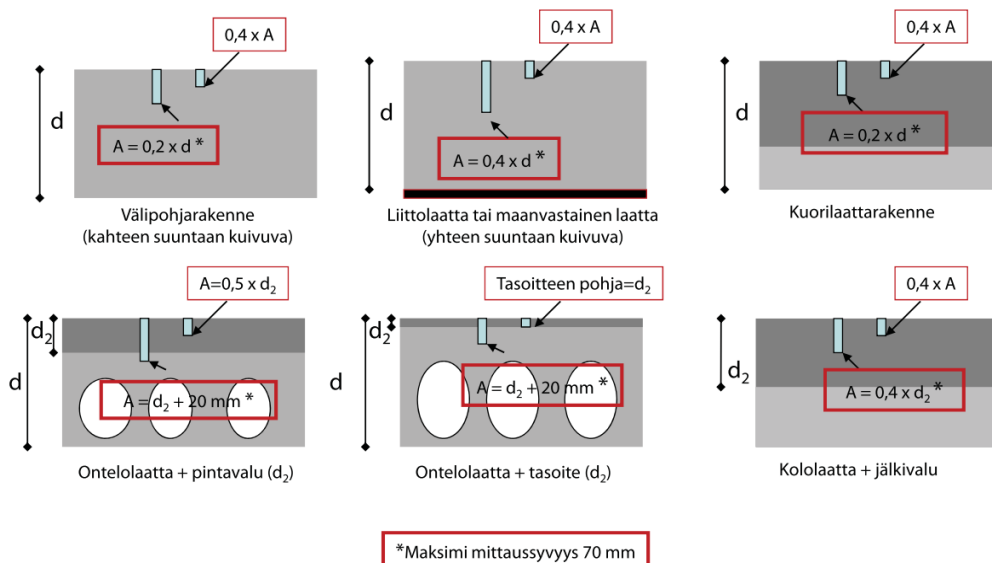
Ennen pinnoitustyön aloittamista tulee todentaa rakenteen kosteustila ja betoniin sitoutuneen rakennekosteuden määrä. Erilaisista laskennallisista arviointitapojen olemassa olosta huolimatta tämä varmentaminen tulee aina tehdä rakenteesta tehtävin kosteusmittauksin. Näiden mittausten tuloksia muihin kosteustekijöihin peilaamalla voidaan arvioida rakenteen pinnoitettavuutta.

Tällä hetkellä Suomessa yleisesti käytössä olevia yleisesti hyväksyttyjä betonin suhteellisen kosteuden mittausmenetelmiä ovat porareikämittaukset sekä koepalamenetelmät.(16, s. 209) Näiden kahden rinnalle on viime vuosina tullut myös rakenteeseen asetettavia sähköisiä mittalaitteita. Aiemmin yleisesti käytettyä materiaalin sähköisiin ominaisuuksiin perustuvaa pintakosteusmittaria ei suositella käytettäväksi. Maailmanlaajuisesti käytössä on lukuisia muita kosteudenmäärittämismenetelmiä. Nämä saattavat työmaalla tulla eteen rakenteen kosteuden raja-arvoa määritettäessä erilaisten materiaalivalmistajien ohjeiden kautta.

Luotettavat mittausmenetelmät ovat rakennetta rikkovia ja melko työläitä. Tästä syystä mittapisteiden sijoittelu tulee suunnitella kosteudenhallintasuunnitelmassa etukäteen ja tarkoituksenmukaisesti paikkoihin.(23, s.3) Mittaussuunnitelmaan merkittäviä asioita on esitelty tämän diplomityön case-kohteen yhteydessä kappaleessa 8.1. Mittausmenetelmää valittaessa on huomioitava muun muassa tutkittava rakenne, kuivumisolosuhteet sekä kuivatusvaihe. Betonin kosteusmittauksessa ohjeena toimii aiheesta laadittu RT-kortti 14-10984.

7.1 Porareikämittaus

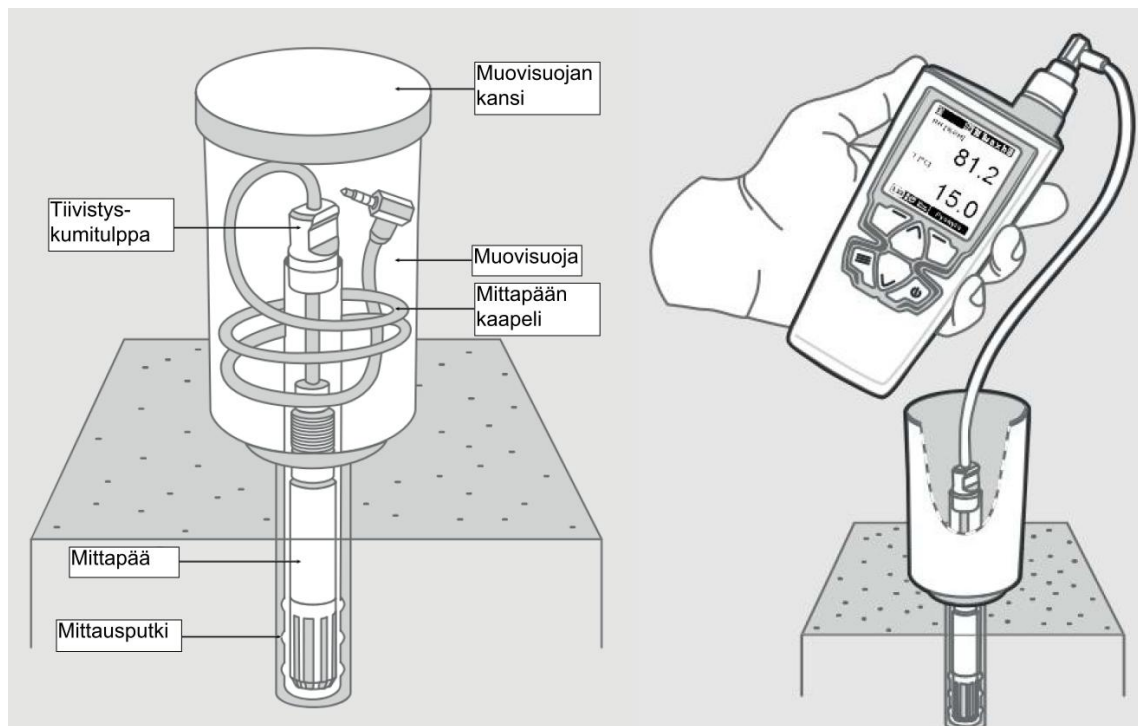
Porareikämittauksessa betonin huokostilan suhteellinen kosteus määritetään rakenteeseen porattavasta reiästä sähköisen mittapään avulla. Tämä mittausmenetelmä on Suomessa tällä hetkellä suositelluin työmaalla suoritettava rakennekosteuden mittaustapa. Kosteuden tarkastelusyvyys riippuu rakennetyypistä, kuivumissuuntien määrästä sekä rakennekosteudesta. Lähtökohtaisesti mittaukset tehdään pisteittäin vähintään kahdelta eri rakennesyvyydeltä. Oheisessa kuvassa 23 on esitetty RT-kortin 14-10984 mukaiset tyypilliset mittaussyvyudet. Samassa kuvassa näkyy myös mittauseriaatteen eri rakennetyyppien välillä.



Kuva 23 Porareikämittausmenetelmän mukaiset mitaussyvytydet rakennetyypeittäin. (23, s. 14)

Poratun reiän syvyys tulee dokumentoida tarkasti ja sen tulee olla millimetrilleen määrätyn tarkastelusyvytyden mukainen. Tiheään raudoitetuissa rakenteissa reiän toteuttaminen halutulla mittatarkkuudella voi olla haasteellista. Porattu reikä puhdistetaan pölystä huolellisesti, jonka jälkeen siihen asetetaan tiivis ja sivuiltaan umpinainen mittausputki. Putkena käytetään erikseen tarkoitusta varten valmistettuja muoviputkia tai vaihtoehtoisesti muovisia sähköputkia. Mittauksen onnistumisen kannalta tärkeintä on putken ja sen liittymän tiiveys sekä putken tulppauksen ilmanpitävyys. Tulppauksen myötä betonin huokosten kosteus pääsee tasaantumaan mittaputken sisälle muodostuvaan ilmatilaan siten, etteivät rakennetta ympäröivät sisäolosuhteet pääse vaikuttamaan mittaustulokseen. Tasapainokosteuden saavuttamiseksi putken on oltava tulppattuna vähintään kolme vuorokautta ennen varsinaisen kosteusmittauksen suorittamista. Porauksen ja putkituksen sekä mittauksen välisenä aikana tilan ja rakenteen kosteus- ja lämpöolosuhteet tulisi pitää tasaisena. Olosuhteiden vaihdellessa rajusti saattaa mittaputkeen esimerkiksi tiivistyä kosteutta aiheuttaen merkittävän mittausvirheen. Työmaaolosuhteissa asetetut mittaputket tulee suojata ja merkitä selvästi, jotta tasaantuminen ei häiriinny eikä mittaputken ilmatila pääse kuivumaan sisäilman vaikutuksesta. Kaikkien työmaalla työskentelevien tulee olla tietoisia kosteusmittausten suorittamisesta, jotta asetettuja mittaputkia ei epähuomiossa rikota tai poisteta ennen aikojaan. (23, s.4-5)

Porareikä suhteellinen kosteus mitataan sähköisellä mittapäällä. Mittapää asetetaan mittaputkeen tiiviisti. Paikalleen asettamisen jälkeen mittapään annetaan tasaantua porareikässä riittävän pitkän aikaa. Tämä tasaantumisaika vaihtelee eri mittapäiden valmistajien välillä ollen 30 min – 4 h. Luotettavin tulos saadaan käytettäessä jo reiän poraus- ja tiivistysvaiheessa mittaputkeen asetettavia mittapäitä. Tällöin mittapää tasaantuu tasapainokosteuteen muun ilmatilan tahdissa. Oheisessa kuvassa 24 on esitetty esimerkkinä yhden mittalaittevalmistajan suositus mittaukseen liittyvän tasaantumisaikan aikaisesta järjestelystä, jossa mittapää on asetettu putkeen heti reiän porauksen jälkeen. Mittausta suorittaessa mittapää liitetään lukulaitteeseen kaapelilla, josta tulokset kirjataan mittapöytäkirjaan raportointia varten.

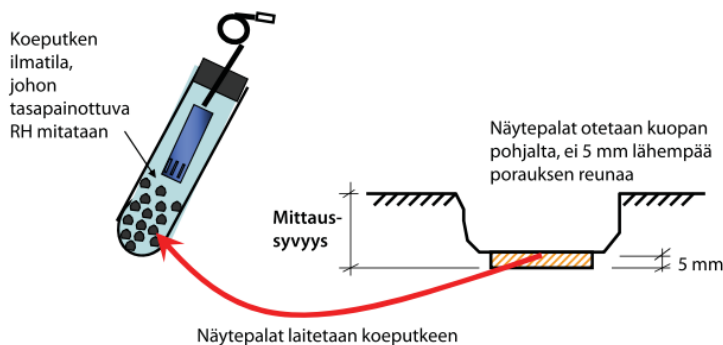


Kuva 24 Esimerkkinä kosteusmittauksen suorittaminen Vaisala Oy:n valmistamalla HMP40S-mittapäällä. Mittapää paikallaan koko porareikän tasaantumisen ajan. (24, s. 26 ja 28)

Porareikämittaus on menetelmänä monta työvaihetta sisältävä tutkimustapa. Lisäksi mittauksen vaiheet ovat merkittävässä määrin mittajan ammattitaidosta ja oikeista työtavoista riippuvaisia. Nämä tekijät yhdessä aiheuttavat sen, että porareikämittaus on väärin suoritettuna virhealtis ja epävarma. Menetelmään liittyvät epävarmuustekijät tulee olla työmaalla hyvin tiedostettuna ja mittauksia tulkitessa on käsitys muodostettava kokonaisuutena monen tekijän summana. Porareikämenetelmän epävarmuustekijöitä on käsitelty tarkemmin luvussa 7.4.

7.2 Näytepalamenetelmä

Näytepalamenetelmässä betonin huokostilan suhteellinen kosteus määritetään rakenteesta irti lohkoistusta näytepaloista. Kohteessa tämä vaatii työvaiheina betonin poraamisesta haluttuun tarkastelusyvyteen, josta irrotetaan tarvittavat noin 5 mm x 5 mm x 5 mm – kokoiset näytepalat joko taltalla tai poraasaralla. Menetelmää käytettäessä tulee kiinnittää huomiota oikean tarkastelusyvyden saavuttamiseen, sillä betoni lohkeaa helposti myös haluttua alapintaa syvemmältä rakenteesta. Pölyttömät näytepalat asetetaan koeputkeen, johon asetetaan kosteusmittauslaitteen mittapää samanaikaisesti näytteen lisäämisen kanssa. Porareikämenetelmää vastaavasti koeputken suuaukon ja mittapään liittymä tiivistetään huolellisesti. Näytteen valmistelun jälkeen koeputki varastoidaan vakio-olosuhteisiin, noin + 20 °C:een olosuhteisiin. Mittapäästä riippuen näytteen annetaan tasaantua vähintään 5-12 tuntia, jonka jälkeen mittapää liitetään lukulaitteeseen ja lukemat kirjataan mittausraporttiin. Mittaus tulisi suorittaa mahdollisimman lähellä rakenteen käyttölämpötilaa siten, että se pysyy vakiona koko mittausuusioksen ajan näytteen koeputkeen asettamisesta lähtien. (23, s. 7) Näytepalamenetelmän peruseräite on esitetty oheisessa kuvassa 25.



Kuva 25 Periaate betonin suhteellisen kosteuden määrittämiseksi näytepalamenetelmällä (23, s. 7)

Porareikämittaukseen verrattuna koepalamenetelmä on lyhemmän tasaantumisaikansa vuoksi nopeasti suoritettava mittaus. Lisäksi tutkimus voidaan suorittaa yhdellä työmaakäynnillä ja tarkkuutta vaativa mittausosuus on hallitumpi. Näytteenotto puolestaan vaatii porareikää suuremman alueen työstämistä aiheuttaen rakenteeseen enemmän paikkaustarvetta. Lisäksi useiden näytepalojen otto samasta kohteesta on työlästä porareikämenetelmään verrattuna.

Näytepalamittaus sisältää menetelmänä porareikämittausta vähemmän tarkkuutta vaativia työvaiheita sekä työmaalla suoritettavaa mittauksityötä ollen näin vähemmän virhealtis. Lisäksi näytepalamenetelmän herkkyys ympäröivien lämpöolosuhteille on vähäisempi. Sen osalta merkittävimmät epävarmuustekijät liittyvät mittapään tekniseen toimivuuteen, ei niinkään mittauksen suorittamiseen. Tällä perusteella näytepalamenetelmän voidaan todeta olevan kahdesta Suomessa yleisemmin käytössä olevasta menetelmästä luotettavampi. (1, s. 60)

7.3 Rakenteessa olevat kiinteät mittalaitteet

Viime vuosina on markkinoille tullut niin sanottujen perinteisten kosteusmittausmenetelmien rinnalle myös elektronisia rakenteeseen pysyvästi asetettavia mittalaitteita. Näiden sovellusten etuna ovat erityisesti rakenteen pysyminen ehjänä, vähäinen työ määrä ja virhemahdollisuus mittauksista tehdessä sekä joidenkin sovellusten osalta myös jatkuva mittausdatan kerääminen ja tiedon lukeminen etäyhteyden kautta tai rakennusautomaatioon syötettynä. Elektronisten menetelmien lähtökohtana on juuri mittajasta johtuvien virheiden ja epävarmuustekijöiden poistaminen.

Markkinoilla olevat tuotevaihtoehdot ovat melko uusia sovelluksia, joiden mittatarkkuudesta ja käyttökelpoisuudesta on tällä hetkellä rajallisesti tietoa. Laadullisten vastuukysymysten takia uudet elektroniset sovellukset tulevat todennäköisesti alkuvaiheessa käyttöön perinteisten kosteusmittausmenetelmien rinnalla siten, että laitteistojen antamia tuloksia tarkastusmitataan esimerkiksi porareikämenetelmällä. Lisätutkimukselle ja vertailutiedoille on kuitenkin työmaaoiloissa kysyntää.

7.4 Kosteusmittauksen epävarmuustekijöiden ja virhemarginaalin huomioiminen

Kuten kaikkiin mittauksiin sisältäviin tutkimusmenetelmiin, myös betonin suhteellisen kosteuden mittaamiseen liittyy tulosten luotettavuutta ja tarkkuutta heikentäviä epävarmuustekijöitä. Luotettavuuteen vaikuttavat neljä päätekijää ovat mittalaitte, mittausmenetelmä,

mittaaja sekä ympäristö. Epävarmuustekijät eivät aiheuta ongelmia, kunhan päätekijät ovat mittaajalla ja työmaaorganisaatiolla selvillä ja niihin on varauduttu ennakolta. Epävarmuustekijät ja virhemarginaalit on hyväksyttävä osana mittausdataa ja mahdolliset systemaattiset virhetekijät on tunnistettava.(1, s. 76)

Mittausvirheet voidaan niiden tyyppin perusteella jakaa kahteen eri ryhmään: systemaattisiin virheisiin ja satunnaisvirheisiin. Systemaattisen virheen tapauksessa jokaisella mittauksella saadaan saman verran todellisuudesta eroava tulos. Saadut tulokset ovat siis tällöin järjestään joko liian suuria tai liian pieniä ilman, että mittauksen suorittaja on tästä tietoinen tai pystyy virheen suuruuteen vaikuttamaan. Tyypillinen ja kuvaava esimerkki systemaattisen virheen aiheuttajasta on virheellisesti kalibroitu tai ominaisuuksiltaan muuten heikentynyt mittalaite. Satunnaisvirheellä puolestaan tarkoitetaan mittausarjan yhden tuloksen poikkeamista kaikkien mittausten keskiarvosta. Satunnaisvirheen aiheuttaja ei ole yksiselitteinen, kuten systemaattisen virheen tapauksessa, vaan kyseessä on vaihtuvasta tekijästä aiheutunut poikkeama. Poikkeaman syynä voivat olla esimerkiksi ympäristöolosuhteet tai mittaajan virheellinen toiminta. Rakennekosteuden suuruutta ja pinnoitettavuutta määritettäessä systemaattisen virheen vaikutukset ovat kahdesta virhetyypistä vakavammat. Systemaattisen virheen seurauksena pinnoitus tehdään pahimmassa tapauksessa joko viikkoja liian aikaisin aiheuttaen vakavia laadullisia riskejä, tai vaihtoehtoisesti tarpeettoman viikkoja kestäneen odotuksen jälkeen aiheuttaen lisäkustannuksia toteutusaikataulun venymisen kautta.(1, s. 76-77)

Kokonaismittausvirheen suuruus on mittaushetkellä harvoin tiedossa tai sen tarkka määrittäminen on jopa mahdotonta. Tällöin mittautulosten raportoinnin yhteydessä käytetään tiettyä mittausepävarmuutta, jonka suuruus riippuu eri virhetekijöiden voimakkuudesta kussakin mittausilanteessa. Tekijöiden painotus saattaa vaihdella työmaalla jopa eri rakennuksen osien välillä olosuhteiden muuttuessa, mittaajan ja mittalaitteen vaihtuessa sekä eri betonilaatujen välillä.(1, s. 76-77)

Porareikämittauksen ollessa yleisin ja monissa tapauksissa myös ainoa hyväksyttävä käytössä olevista mittausmenetelmistä, on ohessa tarkasteltu siihen liittyviä luotettavuustekijöitä tarkemmin. Oheiseen taulukkoon 4 on kerätty muistilistamaisesti porareikämenetelmään liittyviä tekijöitä, jotka työmaan ja suunnittelijoiden on johtopäätöksissään ja rakenteen pinnoitusajankohtaa määrittäessään huomioitava. Lisäksi taulukkoon on kerätty kunakin tekijän kohdalle sen aiheuttaman mahdollisen virhevaikutuksen suuruusluokka kosteusmittautulokseen sekä epävarmuutta vähentävät mittaajan toimet.

Taulukko 4 Porareikämittaukseen liittyvät epävarmuustekijät, näiden aiheuttaman virhevaikutukset tuloksiin sekä hallintakeinot. (1, s.80-98 ja 23, s. 5-6)

Mittausepävarmuuden ja virheen aiheuttaja	Mittausepävarmuuden suunta ja suuruusluokka	Lisätiedot	Hallintatavat
Mittauskohdan valinta rakenteesta	+/- 5 %-yksikköä, tilannekohtaisesti jopa suurempi	Epävarmuustekijän vaikutus vaihtelee suuresti eri rakenneratkaisuiden välillä	Mittauksen suorittaminen rakenteen paksuimmasta ja oletetusti kosteimmasta kohdasta. Huomioitavaa esim. rakennusaikana tapahtunut kastuminen, saumakohtien sijainti sekä lämmittimien asemointi.
Poratun mittausreiän puutteellinen tiivistys	Todellista pienempiä arvoja, vaihdellen muutamista %-yksiköistä kymmeniin	Tavoitteena estää mittausputken olosuhteiden häiriötyminen	Umpinaisten mittausputkien käyttö. Putken tyven ja pään huolellinen tiivistäminen kitillä/tulpalla.
Mittausputken tasaantumisaika poraamisen ja mittauksen välillä liian lyhyt	Todellista suurempia arvoja, ero huomattava vaihdellen suuresti tapauskohtaisesti	Tavoitteena tasapainokosteuden saavuttaminen mittausputkeen	Porauksen ja mittauksen välinen tasaantumisaika 3-5 vuorokautta.
Rakenteen lämpötilan poikkeaminen käyttölämpötilasta	Todellista suurempia arvoja rakenteen lämpötilan ollessa käyttötilaa korkeampi. Todellista pienempiä arvoja rakenteen lämpötilan ollessa käyttötilaa matalampi. Virheen suuruusluokka +/- 5 %-yksiköstä hallitsemattomaan.	Betonin ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi virheen suuruuteen.	Mittauksen suorittaminen mahdollisimman lähellä rakenteen käyttöä vastaavissa olosuhteissa. Lämpöolojen poikkeama enintään +/- 5 °C.
Mittapään ja rakenteen lämpötiloissa merkittävä ero	Todellista suurempia arvoja mittapään lämpötilan ollessa rakennelämpötilaa korkeampi. Todellista pienempiä arvoja mittapään lämpötilan ollessa rakennelämpötilaa matalampi. Virheen suuruusluokka +/- 5 %-yksiköstä hallitsemattomaan.	Mittalaitteiden välillä eroja.	Mittapään annetaan tasaantua rakenteen/tilan lämpötilaan ennen porareikään asettamista.
Mittalaitteen ominaistarkkuus	+/- 2 %-yksikköä (kun RH 0-100 %) +/- 3 %-yksikköä (kun RH 90-100 %)	Vaihtelee laitteiden välillä, esimerkkinä Vaisalan HMP 44-anturi	Laitetyypin valinta.
Mittalaitteen kalibroinnin laiminlyönti	Pienimmillään +/- 4 %-yksikköä, käytännössä hallitsematon	Mittalaitteiden väliset yksilölliset erot huomattavan suuria	Säännöllinen kalibrointi valmistajan ohjeiden mukaan. Opimitilanteessa kalibrointi suoritetaan joka mittauksen yhteydessä, käytännössä 6 tai 12 kk välein.
Mittapään tasaantumisaika porareikässä liian lyhyt	Todellista pienempiä arvoja, jopa kymmeniä %-yksikköjä	Tasaantumisaika vaihtelee suuresti mittapään kosteuskapasiteetista riippuen	Riittävän pitkän tasaantumisaajan varmistaminen, laitevalmistajan ohjeiden mukaan toimiminen. Käytännössä aika vaihtelee 15 minuutista tunteihin.
Mittapään ja porareikä epätiivis liittyminen	Todellista pienempiä arvoja, jopa kymmeniä %-yksikköjä	Vastaa epävarmuutena reiän poraamisen jälkeistä mittaputken tiivistystä	Mittapään asettamisen jälkeen riittävä tiivistys, tiivistyshenkilöiden laitteiden käyttö.

Kuten oheisesta taulukosta nähdään, ovat porareikämittaukseen liittyvät epävarmuustekijät monimutkaisia ja osin myös vaikeasti hallittavia tai työmaaoloissa jopa mahdottomia välttää. Mittaustuloksia raportoidessa tulisi mittaajan aina huomioida omana osuutenaan myös mittauksen luotettavuuden arviointi. Tätä varten mittaajalla tulee olla näkemys kokonaisuudesta aina mittaustapahtuman toteuttamisesta vallitseviin olosuhteisiin. Pelkän suhteellisen kosteuden lukuarvon perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä kokonaisuudesta. Mittaukseen liittyvien epävarmuustekijöiden hyväksyminen ja huomioiminen ovat pinnoituskelpoisuuden ja pinnoitettavuuden riskiarvioinnin perustekijöitä. Mittauksessa vallitsevien tekijöiden virhevaikutuksen arviointi lukuarvoin voi monissa tapauksissa olla mahdotonta. Tämä ei poista mittaajan vastuuta huomioida epävarmuustekijöiden olemassaolo mittausraportissaan. Pätevän mittaajan tulee pystyä aina arvioimaan tulosten luotettavuus sekä virhemarginaalin suunta ja suuruusluokka. Vähimmäistapauksessa virhemarginaalinsa suuruuden vuoksi epäonnistuneen mittauksen tulee toimia työmaatoteutuksen apuna kuivumis- ja mittaolosuhteiden parantamiseksi. Edellä esitetty taulukko toimiikin työmaalla ennakkoivana muistilistana olosuhteita arvioitaessa.

8 Case-tutkimus

Diplomityöhön liittyvää case-tutkimusta tehtiin kohdeyrityksen pääkaupunkiseudulla sijaitsevalla toimitilakohteen uudisrakennustyömaalla. Kohde oli rungoltaan sekä elementti- että paikallavalurakenteinen. Paikallavalurakenteiden lisäksi kosteudenhallinnan kannalta haasteellisia osa-alueita olivat muun muassa kerrokselliset julkisivut sekä vesikattorakenteet.

Diplomityön tekijä toimi työmaalla laatu- ja kosteudenhallinta-asioita hoitavana projektinsinöörinä vastaten muun muassa kosteudenhallintaraportoinnista ja kosteusmittausten teettämisestä. Tässä työssä esitetyt toimintakuvaukset ja laskelmat on laadittu työmaalla osana kosteudenhallintaprosessia tai työmaan kokemuksista kehittäen. Kohteen luonteen vuoksi siihen liittyvät yksityiskohdat ovat salassa pidettävää tietoa. Tästä johtuen työssä ei esitetä suoraan tarkkoja suunnitelma- tai rakennetyypitietoja.

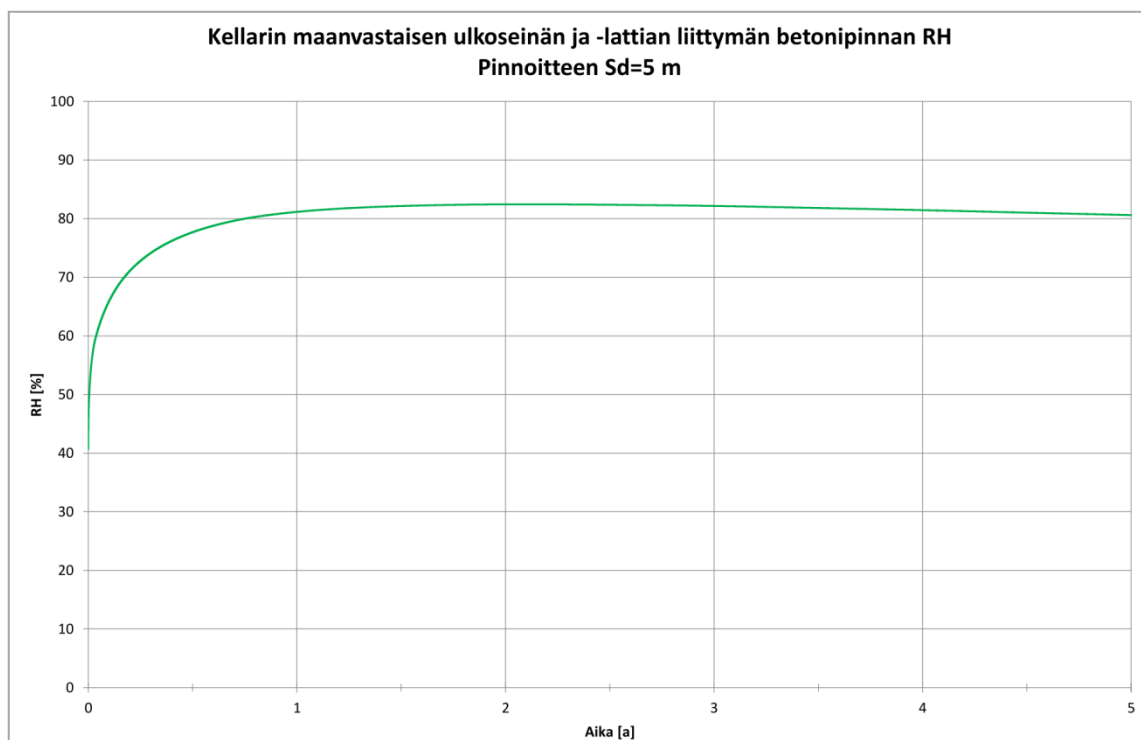
8.1 Kosteudenhallinnan kannalta kriittisten seikkojen tunnistaminen ja kosteudenhallintasuunnitelman laatiminen

Projektin kosteudenhallintaprosessi alkoi hyvissä ajoin ennen varsinaisen rakentamistoiminnan aloittamista suunnittelun rinnalla. Pää toteuttajan työmaaorganisaatio liittyi mukaan urakkalaskenta- ja työpiirustusvaiheessa. Suunnittelun ohjauksessa tämä näkyi käytännön tasolla suurten kokonaisuuksien osalta suunnittelukokouksissa sekä detaljiikan viimeistelyn osalta pienpalavereissa ja osakokonaisuuksittain tehdyissä suunnitelmakatselmuksissa.

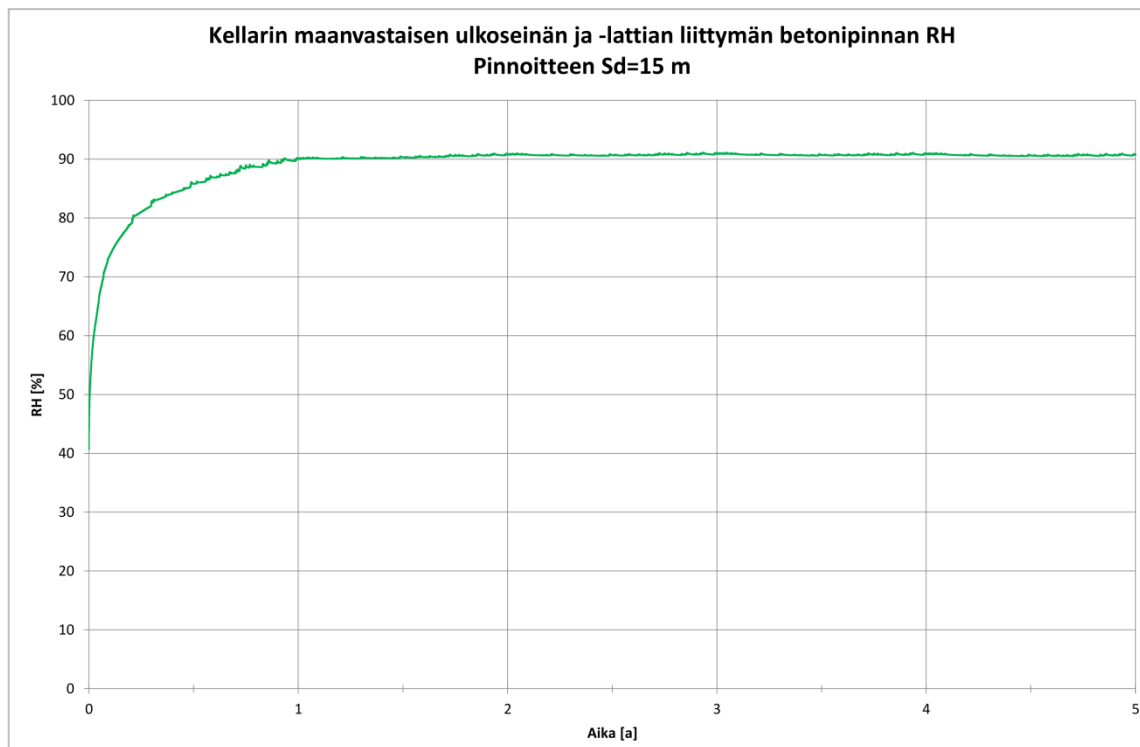
Prosessin aikana suunnitteluratkaisuja kommentoitiin kaikkien osapuolten kesken tuoden mukaan myös kunkin erityisalan aliurakoitsijat, esimerkkinä vesikatto- ja vedeneristysurakoitsijan toteutusmallit. Toimintatavan pyrkimyksenä oli sitouttaa kaikki hankkeen osapuolet valittuihin ratkaisuihin. Betonirakenteiden kuivumisen kannalta tärkein detaljitason suunnitteluasia oli betonimassan ominaisuuksien, erityisesti vesi-sementtisuhteen optimointi. Massiivisten ja tiheästi raudoitettujen rakenteiden osalta kosteuden minimointi ja työstettävyystekijät asettivat vastakkaiset lähtökohdat, joten valittavaa ratkaisua jouduttiin optimoimaan. Paikallavalurakenteiden kuivumisen varmistamisessa oleellinen tekijä oli vesi-sementtisuhteen ylärajan 0,5 määrittäminen suunnittelun lähtökodaksi.

Konkreettisella tasolla työmaan kosteudenhallintaprosessi esitettiin erillisissä kosteudenhallintasuunnitelmissa, jotka laadittiin projektissa sekä päätoteuttajan että rakennesuunnittelijan toimesta. Kosteudenhallintasuunnitelman pohjana oli kosteusteknisesti kriittisten tekijöiden tunnistaminen ja listaaminen. Näiden todettiin olevan seurausta rakenneratkaisuista, käyttötarkoituksesta sekä toteutuksen haasteellisuudesta. Kosteudenhallintasuunnitelmassa kunkin kriittisen tekijän osalta eriteltiin mahdolliset hättävähäikutukset sekä toimenpiteet näiden estämiseksi.

Kosteudenhallintaprosessia suunniteltaessa kriittisimpänä nousi esiin kohteen laajojen ja paikoin myös dimensioiltaan massiivisten paikallavalurakenteiden kosteudenhallinta, erityisesti pinnoitettavuuden varmistaminen. Osaltaan kosteusteknistä haastetta lisäsi rakenneratkaisun lisäksi tilojen käyttötarkoituksen vaatima kestävä ja tiivis pinnoite, joka päädyttiin toteuttamaan seinien ja kattojen osalta epoksimaalilla sekä lattian osalta epoksimasalla. Näin ollen pinnoitettavuutta ja rakenteen kosteusteknistä toimivuutta päädyttiin tarkastelemaan monesta eri tarkastelulähtökohdasta huomioiden paitsi betonin ominaisuudet ja kuivumiskyky, myös pinnoitteen vesihöyrynläpäisevyys ja pitkäaikaiskestävyyden varmistaminen. Kriittisimpien rakenteiden osalta epoksinpinnoitteen kosteusteknisestä toiminnasta laadittiin rakentamisaikana konsultin toimesta erillinen työmaan toimittamiin kosteusmittaustuloksiin perustunut laskennallinen tarkastelu. Mallinnuksen tuloksena saatiin betonin ja pinnoitteen välisen rajapinnan suhteellisen kosteuden arvoja kahdelle eri maali-tuotteelle seuraavan viiden vuoden aikajänteellä. Tulokset on esitetty oheisissa kuvissa 26 ja 27. Tarkastelu on suoritettu WUFI-ohjelmistolla.



Kuva 26 Rakenteen suhteellisen kosteuden laskennallinen tarkastelu pinnoituksen jälkeen, kun pinnoite vesihöyryä läpäisevä (25)



Kuva 27 Rakenteen suhteellisen kosteuden laskennallinen tarkastelu pinnoituksen jälkeen, kun pinnoite hyvin vähän vesihöyryä läpäisevä (25)

Laskennallinen tarkastelu on laadittu kahdelle eri epoksimaalille, joista valmistajan CE-merkinnän ja vaatimustenmukaisuusvakuutuksen mukaan toinen on vesihöyrynläpäisevyydeltään standardin SFS-EN 1504-2 mukaista luokkaa I, toinen luokkaa II. Kyseinen standardi käsittää betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet. Luokan I ($S_D < 5$ m) tuotteita voidaan kuvailla vesihöyryä läpäiseviksi, luokan II ($5 \text{ m} < S_D < 50$ m) tuotteet vähän vesihöyryä läpäiseviksi. (26, s. 16)

Molempien maalityyppien on siis oletettu olevan vesihöyrynläpäisevyyden osalla luokituksen vaihteluvälien ylärajalla. Tämä osaltaan lisää tarkastelun varmuutta. Mallinnuksen lähtökohtana oli kosteusmittaustuloksin todettu tilojen suurin suhteellisen kosteuden arvo 92 prosenttia. Tarkastelun tuloksena todettiin, että luokkaan I kuuluvaa maalia käytettäessä rajapinnan kosteustila ei pääse nousemaan tarkastelun aikana yli 83 prosentin. Viiden vuoden tarkasteluajankohdan loppupuolella rakenne alkaa jopa jo kuivua lisää. Tiiviimmän, luokkaan II kuuluvan tuotteen kohdalla suhteellinen kosteus nousee maalauksen jälkeen ensimmäisen vuoden aikana päällystämishetkellä tarkastelusyvytydellä vallinneeseen arvoon, ollen tässä tapauksessa maksimissaan RH 92 %. Viiden vuoden tarkasteluajanjaksolla suhteellinen kosteus ei laske, mutta mikä tärkeintä myöskään nouse alkuvaiheen arvosta. Valittu lähtötilanteen kosteus itsessään oli rakennusosasta mitatuista arvoista korkein, joka osaltaan lisäsi tarkastelun johtopäätösten marginaalia.

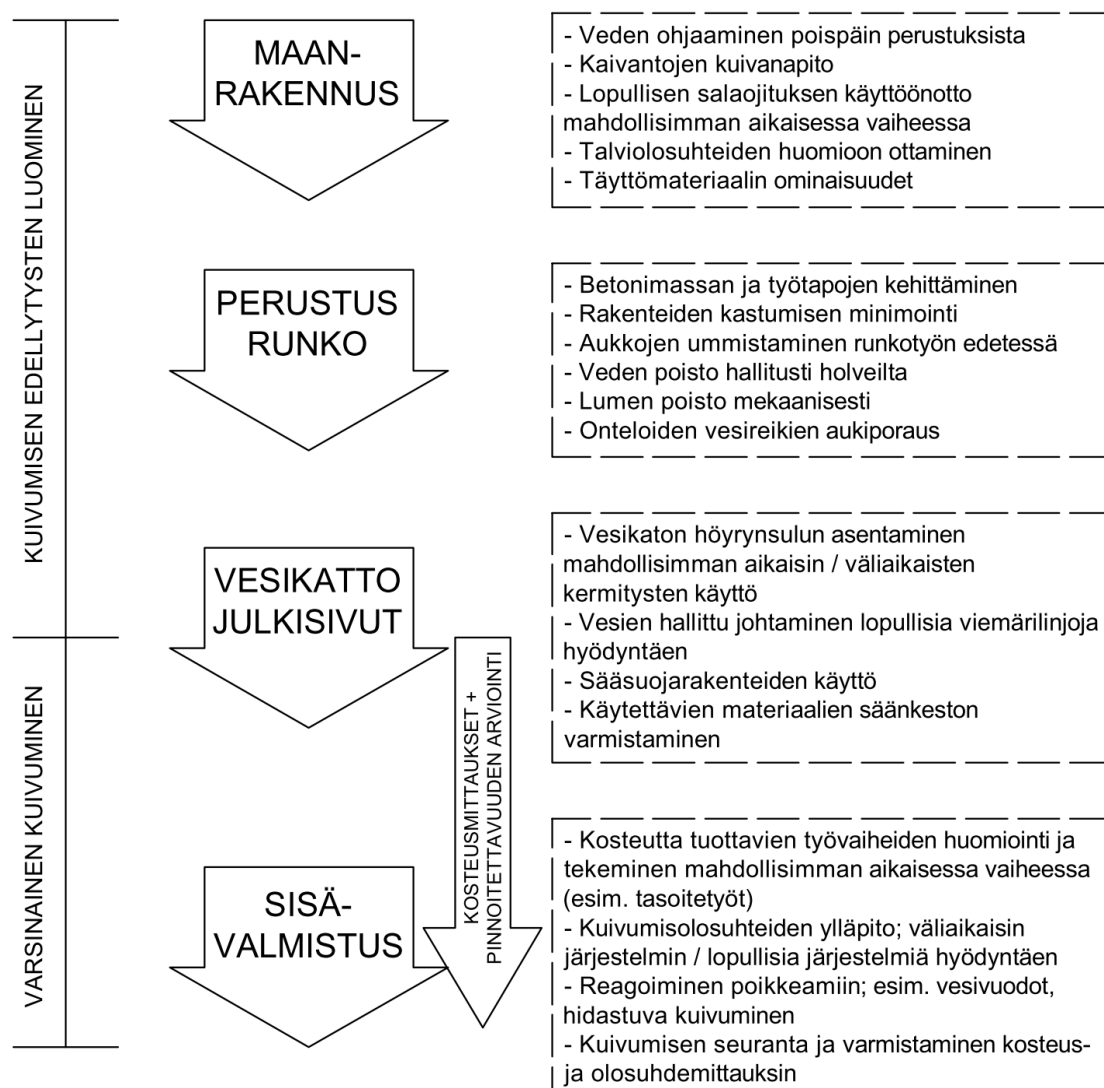
Yhteenvedona tarkastelun perusteella todettiin, että molemmat maalityypit soveltuvat kohteessa käytettäväksi eikä maalivaihtoehtoista tiiveimmänkään pinnoitteen osalta ole vaaraa esimerkiksi homehtumiselle. Case-kohteessa päädyttiin käyttämään molempia tuotteita rakenteesta ja niihin käytön aikana kohdistuvasta rasituksesta riippuen. Paremmiin vesihöyryä läpäisevällä tuotteella pinnoitettiin rakennekosteuden kannalta kriittiset paikat, kuten maanvastaiset kellarin seinät. Samoin tuotetta käytettiin tiloissa, joissa pinnoitteen tarkkailu ja huolto voivat käytönaikana olla haasteellista johtuen esimerkiksi raskaiden kiintokalusteiden sijoittelusta. Avoimilla, jatkuvan tarkkailun alla olevilla pinnoilla käytet-

tiin rakennuksen käyttötarkoitukseen paremmin soveltuvaa, mutta heikommin vesihöyryä läpäisevää tuotetta. Syynä siihen, että vesihöyrytiiviimpää pinnoitetta ylipäätään käytettiin, oli tuotteen paremmin tilojen erikoiskäyttötarkoitusta vastaavat ominaisuudet.

8.2 Kosteudenhallinnan toteuttamisen peruseriaatteen työmaalla

Case-työmaalla kosteudenhallinta keskittyi erityisesti betonin kuivumisolosuhteiden varmistamiseen. Tämä tavoite tuki myös muuta rakentamista luoden edellytykset esimerkiksi vesikatto- ja julkisivutöiden laadukkaalle suorittamiselle. Oheisessa kuvassa 28 on esitetty kaaviomuodossa case-työmaan kosteudenhallintatoimien konkreettisia pääkohtia eri rakentamisvaiheiden osalta. Kaavio korostaa kosteudenhallintaprosessin monipuolisuutta sekä vaikutusta lähes kaikkiin rakennustyön vaiheisiin.

Kosteuden hallinnassa työtapoja on useita ja käytännössä työmaatason toimet vaihtelevat eri projektien välillä suuresti. Käytännön suorittamiseen vaikuttavat lukuisat tekijät rakennuksen runkojärjestelmästä ja mittasuhteista rakennuspaikan ominaisuuksiin ja olosuhteisiin. Eri työvaiheiden kosteusteknisen merkityksen tunnistaminen on olennaista hallitun prosessin aikaansaamiseksi.



Kuva 28 Case-kohteen rakentamistoiminnan aikaisen kosteudenhallinnan kulku ja päätoimenpiteet

Case-kohteen osalta kuivumista edistettiin runkovaiheessa ensisijaisesti sisään pääsevän kosteuden minimoimisella, osastoinneilla sekä kuivumisen tehostamisella koneellisesti. Lähtökohtana oli ummistaa rungon aukot mahdollisimman aikaisessa vaiheessa väliaikaisilla suojarakenteilla, jotka korvattaisiin lopullisilla rakennusosilla eli ikkunoilla ja ovilla myöhemmin toteutusaikataulun mukaisesti. Holveilla olevat suurimmat aukot tiivistettiin vanerisuojiin lisäksi väliaikaisilla vedeneristyksillä. Tapa on melko työläs toteuttaa, mutta toimi kohteessa tehokkaasti erityisesti lukuisia suurehkoja aukkoja sisältäneen ilmanvaih- tokonehuoneen osalta. Aukkosuojan toteutustapa on esitetty ohessa kuvassa 29. Runkovai- heessa olennaista on veden hallittu johtaminen pois holvitasoilta sekä talviaikaan lumen poistaminen pääosin mekaanisesti. Lumen sulattaminen tulisi tehdä vain tapauksissa, joissa mekaaninen poisto on esimerkiksi tilanahtauden takia mahdotonta. Runkovaiheen jälkeen ja vesikattotöiden valmistuttua välikerrosten väliaikaiset aukkosuojat tarjoavat apua mah- dollisten vuotovesien hallinnassa. Läpi rakennuksen tapahtuvaa vuoto- ja sadevesien kul- keutumista tulisi välttää, jotta mahdollista lisäkuivatusta vaativa alue saadaan minimoitua ja rajattua.



Kuva 29 Case-kohteen runkovaiheen aukkosuojia.

Rakentamista ennakoivassa kosteudenhallintaprosessissa olennaisiksi tekijöiksi määritet- tiin vesikaton pohjahöyrynsulkukermin mahdollisimman aikainen asennus sekä vesikatto- töiden sääsuojauksen toteuttaminen. Näiden toimien tekeminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa mahdollisti paitsi rakenteiden kuivumisen alkamisen, varmisti myös hallitut olo- suhteet vesikattotöiden suorittamiselle. Yläpohjan höyrynsulkukermin yhteydessä asennet- tiin myös rakennuksen lopullisiin kattokaivoihin yhtyvät höyrynsulkukaivot. Rakennuksen lopullinen sadevesiviemärointi tehtiin muutamia väliaikaisratkaisuja lukuun ottamatta laa- jasti valmiiksi jo rakentamisen runkovaiheessa. Näillä ratkaisulla saatiin sadevedet johde- tuksi holveilta heti runkovaiheen päättymisen jälkeen hallitusti ja toimintavarmasti raken- nuksen omaan hulevesiverkostoon.

Case-kohteen kosteudenhallinnan kannalta merkittävin osatekijä oli runkovaiheen jälkeen asennettu työnaikainen sääsuoja, joka mahdollisti vesikaton lämmöneristys- ja kermistöiden suorittamisen hallituissa olosuhteissa. Tämä vaikuttaa olennaisesti paitsi lopputuotteen laatuun ja kosteustekniseen varmuuteen myös työsuorituksen tehoon olosuhdehaittojen mi- nimoituessa. Vesikaton sääsuoja asennettiin kokonaisuudeksi julkisivutelineiden yhteyteen, jolloin kaikki ulkovaipan työt, kriittisimpänä lämmöneristeen asennustyöt, voitiin tehdä vesi- ja lumisateelta suojassa. Alla olevassa kuvassa 30 on kuvia kohteen sääsuojasta.



Kuva 30 Työmaan vesikaton sääsuoja ja julkisivun telineet muodostivat kokonaisuuden. Vasemmanpuoleisessa kuvassa myös vesikaton höyrinsulkukermi ja kattokaivoihin liitettävät höyrinsulkukaivot, jotka mahdollistivat hallitun sadevesien johtamisen heti runkovaiheen perään ennen kuin sääsuoja oli saatu asennettua.

Julkisivu- ja vesikattovaiheessa lähinnä työskentelyolosuhteiden ylläpitämiseksi tehty lämmittäminen suoritettiin siirrettävillä polttoöljylämmittimillä, joiden tehontuotto on noin 200 kW. Vaipan ummistamisen jälkeen kosteudenhallinnan, erityisesti rakennekosteuden kuivattamisen apuvälineinä olivat erilaiset sähkö- ja kaukolämpökäyttöiset lämmittimet, kosteudenerottimet sekä kanavapuhaltimet. Rakennuksen sisäpuolinen lämmitys suoritettiin talviaikaan pääosin väliaikaisen kaukolämpölämmönvaihtimen sekä tähän liitettyjen vesikiertoisten lämmittimien avulla. Työmaan aikataulusuunnittelussa todettiinkin tärkeäksi tavoitteeksi lopullisen kaukolämpölinjan rakentaminen rakennuksen lämmönjakohuoneeseen. Vesikiertoiset lämmittimet asennettiin verkostoksi läpi rakennusrungon ja niiden tehot vaihtelivat tilakohtaisten tarpeiden mukaan 50 ja 200 kW:n välillä. Kuvassa 31 on esitetty kaksi eri lämpöpuhallinmallia, lämmitystehoiltaan 50 ja 100 kW. Työnaikaisista vesikiertoisista lämmittimistä siirryttiin vaiheittain käyttämään talon omaa lämmitysjärjestelmää. Osaltaan tätä muutosta helpotti kesäaikaan sijoittuneet lopullisten lämmönsiirtimien asennusajankohdat. Sähkötoimisia lämmittimiä käytettiin lähinnä tukemaan vesikiertoista järjestelmää lisälämmittämällä katveeseen jääneitä tai erityiskuivattamista tarvitsevia tiloja.

Kaukolämpöverkkoon liitettävillä vesikiertoisilla lämmittimillä tavoiteltiin erityisesti energiatehokkuutta ja laajoja alueita palvelevaa lämmitysmuotoa. Case-kohteessa saatujen kokemusten perusteella nämä tavoitteet myös saavutettiin. Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän osalta tulee kuitenkin käytön aikana kiinnittää erityishuomiota verkoston kuntoon ja vuotoriskiin. Mahdolliset vuodot ovat tapahtuessaan massiivisia ja aiheuttavat kuivatettaville rakenteille merkittäviä lisäkuivatustarpeita, vaarantaen pahimmassa tapauksessa koko hankkeen aikataulun. Case-kohteessa verkoston tiiveyttä valvottiin paitsi aktiivisella seurannalla ja tarkastuksilla myös järjestelmään kytketyllä etävalvonnalla, joka hälytti poikkeustilanteessa lämmitysjärjestelmän toimittajan päivystäjän paikalle.



Kuva 31 Käytettyjen lämpöpuhallinten määrä ja teholuokka vaihtelivat lohko- ja tilakohtaisesti. Vasemmanpuoleisessa kuvassa 100 kW:n lämmittimiä, oikealla 50 kW:n lämmitin.

Rakennekosteuden kuivattamisessa työmaalla käytettiin lämmityksen ohella siirreltäviä kosteudenerottimia. Erottimet kierrättävät tilan sisäilmaa kondensoiden samalla ilmassa olevan kosteuden nestemäiseen olomuotoon. Kosteimpaan vuodenaikaan vettä kertyy laitteen säiliöön suuri määrä. Case-kohteessa laitteen poistoputki olikin kytkettynä suoraan rakennuksen viemärijärjestelmään, jolloin jo kerran poistettu kosteus ei pääse vapautumaan uudestaan kuivatettavan tilan sisäilmaan muodostaen jälleen uutta kosteuskuormaa. Viemärinti tekee kosteudenerottimesta myös huoltovapaamman. Työmaaolosuhteissa kosteudenerottimien tulee olla rakenteeltaan kestäviä ja helposti siirrettäviä esimerkiksi putki- ja peltirakenteisia laitteita. Esimerkkinä on kuvassa 32 esitetty laajalti työmailla käytössä oleva kosteudenerotinmalli. Kuvan mukainen case-työmaallakin käytetty kosteudenerotin pystyy erottamaan kosteutta yli kolmen celsius-asteen lämpötilassa olevasta ilmasta. Käytännössä tämä riittää työmaan tarpeisiin mainiosti kuivatustarpeen kasvaessa ulkoilman lämpötilan noustessa. Tehoa tarvitaankin erityisesti lämpötilan ollessa lähellä 20 °C:ta ja suhteellisen kosteuden 70 prosentin luokkaa. Kosteudenerottimien tarpeen ennakointia on käsitelty tarkemmin seuraavan kappaleen 8.3 kuivatuslaskelmissa.



Kuva 32 Työmaaolosuhteissa yleisesti käytetty kosteudenerotinmalli (www.remko.de)

Case-kohteen työmaalla käytettiin kuivumisalueiden osastoinneissa väliaikaisia vanerisia ja muovisia ovia sekä väliseiniä. Lisäksi käytettiin mahdollisuuksien mukaan hyväksi rakennuksen lopullisia ovia ja ikkunoita varsinkin ulkovaipan ummistamisen osalta. Ilman siirtoon käytettiin mahdollisimman yksinkertaisia ja varmatoimisia kanavapuhaltimia sekä joko peltisiä tai muovisia kanavia. Aukkosuojaukseen, osastointeihin sekä ilmanvaihdon hallintaan case-kohteessa käytettyjä ratkaisuja on esitetty oheisessa kuvassa 33.

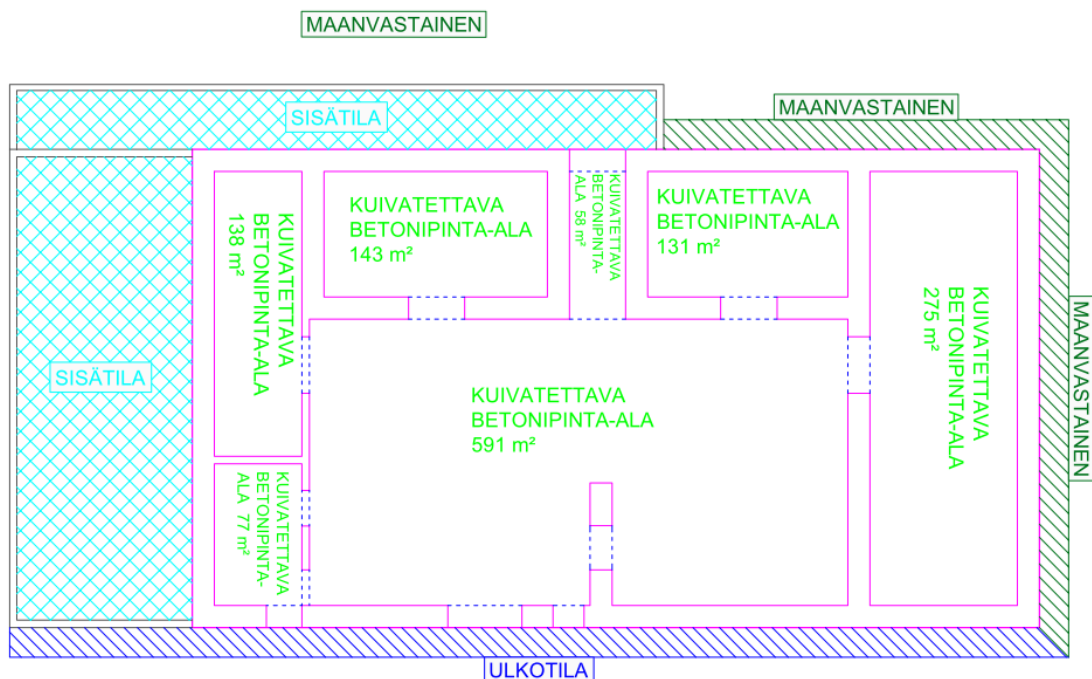


Kuva 33 Esimerkkitapauksia osastointien ja aukkosuojausten suorittamisesta.

8.3 Yksittäisten osalohkojen kuivumisolosuhteiden suunnittelu ja seuranta

Kosteudenhallinnan ja rakennekosteuden kuivatuksen suunnitteluvaiheessa erityis seurattavaksi osa-alueeksi määritettiin kohteen kellaritilat. Kyseessä on paikallavalurakenteinen tila, jonka massiiviset dimensiot vaativat kuivumisen erityistä huomioon ottamista. Tässä kappaleessa käsitellään kellaritilan kuivumisolosuhteiden ennakkosuunnittelua laskennallisin keinoin. Käsittelytapa oli alustavasti käytössä myös case-kohteessa, mutta esitetään tässä diplomityössä projektin kokemusten perusteella jalostettuna.

Kuten alapuolella esitetystä kuvan 34 pohjapiirustuksesta huomataan muodostaa massiivisten rakenteiden rajaama alue selkeän kokonaisuuden kellarissa, jota voidaan hallita joko kokonaisuutena tai osiin jaettuna. Oheiseen pohjapiirustukseen on lisäksi merkittynä kunkin tilan osalta betonipintojen yhteenlaskettu pinta-ala eli kuivatettavan rakenteen ala. Tässä tapauksessa kaikki rakenteet ovat toteutettu paikallavaluna, jolloin mukaan lasketaan lattiat, seinät ja katot. Betonipinnan ala toimii tässä laskelmassa kuivattamistarvetta määrittävänä tekijänä.

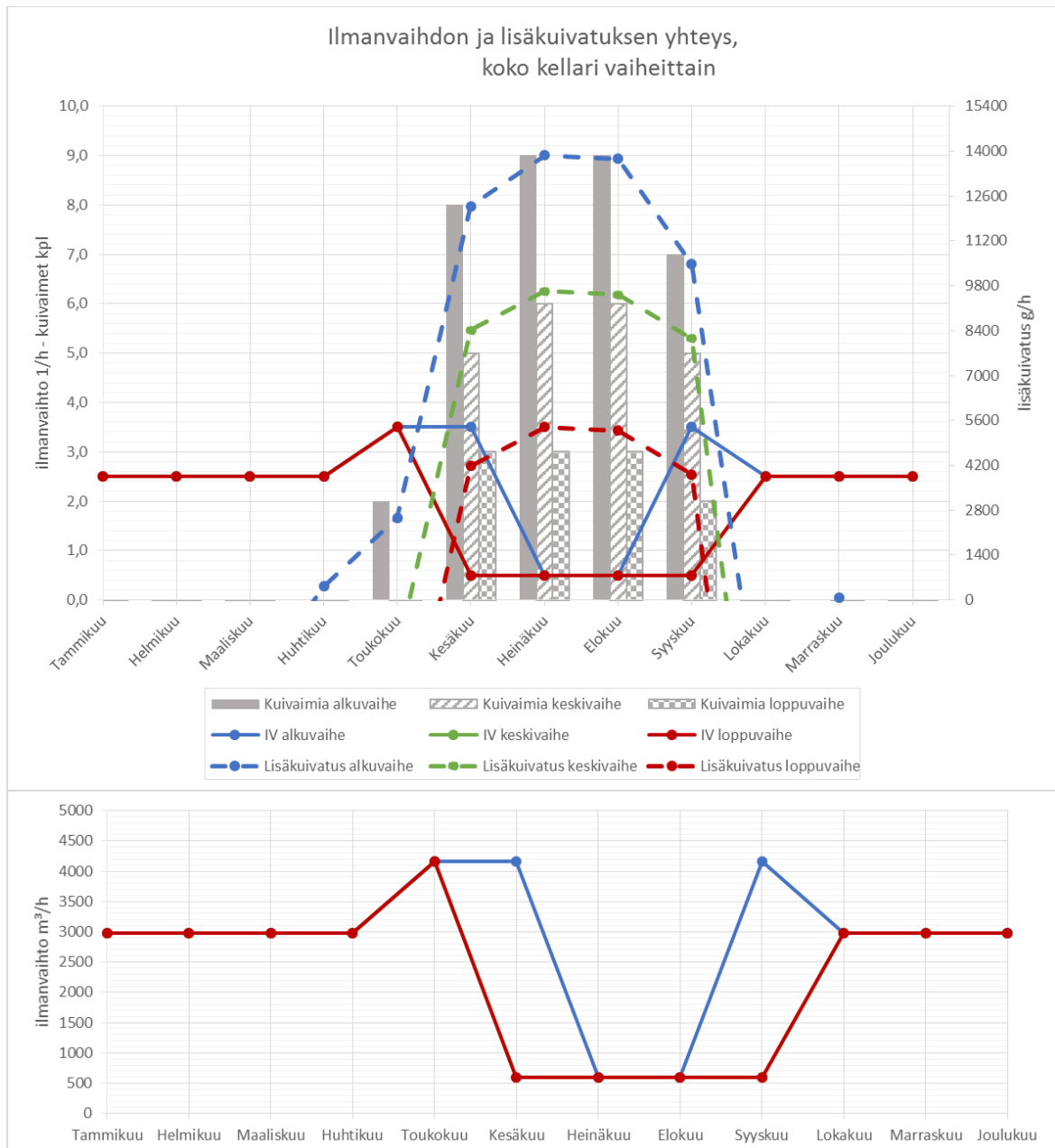


Kuva 34 Case-tutkimuskohteen kosteusteknisesti erityisvalvottava kellaritila

Kellaritilan olosuhdetarkastelut suoritettiin kolmessa eri kuivumisen vaiheessa, betonin kosteudentuoton muuttuessa vaiheittain: alkuvaiheessa 9 g/m^2 ; keskivaiheessa 6 g/m^3 sekä loppuvaiheessa 3 g/m^3 . Kosteudentuottoarvot perustuvat Björkholtzin julkaisussa esitettyihin arvoihin. (21, s. 26) Vastaava tarkastelu olisi suositeltavaa tehdä hyvissä ajoin ennen rakennusvaipan sulkemista ja tilan kuivattamisen aloittamista. Näin voidaan suorittaa alustava osastointi sekä hankkia tarvittava kuivauskalusto ennakolta työmaalle.

Kuivumisolosuhteiden laskennan perusteena on käytetty kuivatettavan tilan sisäilman kykyä sitoa tilaan betonirakenteesta tulevaa kosteutta. Oletuksena on, ettei tilassa betonin kuivumisen lisäksi ole muuta kosteustuottoa. Case-kohteen tapauksessa kellaritila rauhoitettiin työskentelyltä kuivumisen ajaksi, jolloin myös kosteustuotto saatiin minimoitua. Käytännössä tämä toteutuu työmaatilanteessa harvoin, sillä kuivatettavissa tiloissa tehdään pinnoitusta edeltäviä töitä jatkuvasti. Osa näistä töistä saattaa kasvattaa kosteuskuormaa huomattavastikin, esimerkkinä tasoite- ja paikkaustyöt. Lisäkosteustuottoa voidaan pyrkiä minimoimaan tekemällä märkätöiden valmistelut ulkotiloissa tai erillisen kohdepoiston vaikutusalueella.

Kellaritiloihin tehdyn alustavan tarkastelun perusteella todettiin koko kellaritilan kuivattaminen yhtenä osastona olevan haasteellista ja vaativan suuren määrän kuivauskalustoa varsinkin kesäaikaan. Alustavan tarkastelun tulokset on esitetty oheisessa kuvassa 35. Tarkastelussa oletuksena on, että käytettävä korvausilma on kokonaisuudessaan ulkoilmaa ja sen ominaisuudet noudattavat edellä kappaleessa 6.2 esitettyjä Helsinki-Vantaan lentoaseman ilmastotietoja. Kosteudenerottimen kuivausteholle on käytetty tyypillisen laitteen teknisten tietojen mukaista 1600 g/h . Ilmanvaihdon määrä on rajoitettu 3,5 vaihtoon tunnissa, joka sekin vaatii merkittävän ilmanvaihtotehon kyseiseen tilaan. Kuvan 35 kuvaajissa on esitetty tilan ilmanvaihdon tarve ($1/\text{h}$ sekä m^3/h) sekä tarvittavan lisäkuivatuksen (g/h sekä kuivainten määränä). Tarkastelu on tehty betonirakenteen kuivumisen alku-, keski- ja loppuvaiheille.

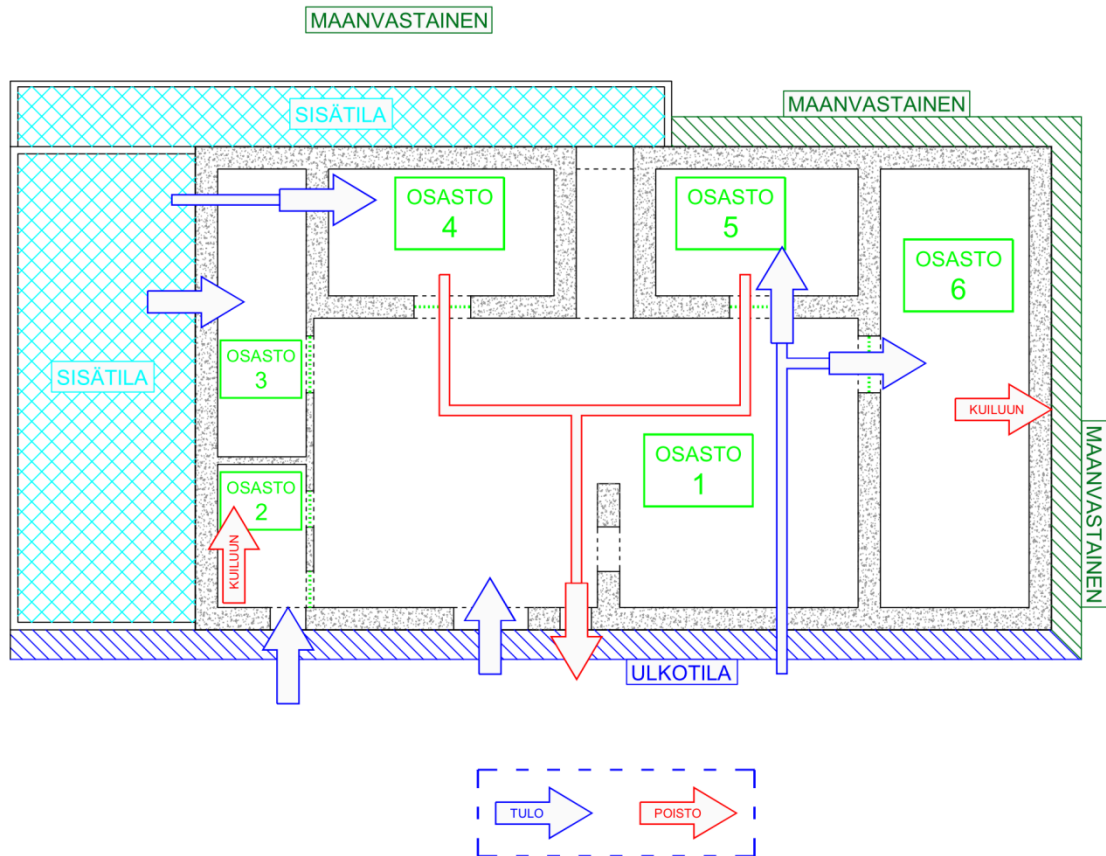


Kuva 35 Case-tutkimuskohteen kellaritilan kuivattamisen tarvittava ilmanvaihto sekä ilmankuivaimien tarve.

Alustavan tarkastelun perusteella suurellakaan ilmanvaihtomäärällä sekä ilmankuivareiden määrällä ei kellaritilaan tässä laajuudessa onnistuta kesä- ja syysaikaan luomaan tehokkaita kuivumisolosuhteita. Esimerkiksi kuivatuksen alkaessa heinäkuussa heti betonoinnin perään joudutaan tilan lisäkuivatukseseen käyttämään yhdeksää kuivauslaitetta kerrallaan. Käytännössä kellaria voidaan kuivattaa tarkastelun mukaisena suurena kokonaisuutena korkeintaan talviaikaan, jolloin korvausilmana toimivan ulkoilman kosteussisältö on pieni. Tällöinkin kuvaajassa esitetty ilmanvaihtomäärä 2,5 vaihtoa tunnissa vastaa ilmavirtana lähes 3000 m³/h:ssa. Näin ollen jo pelkkä ilmanvaihdon toteuttaminen vaatii useita poistoilmareittejä ja puhaltimia.

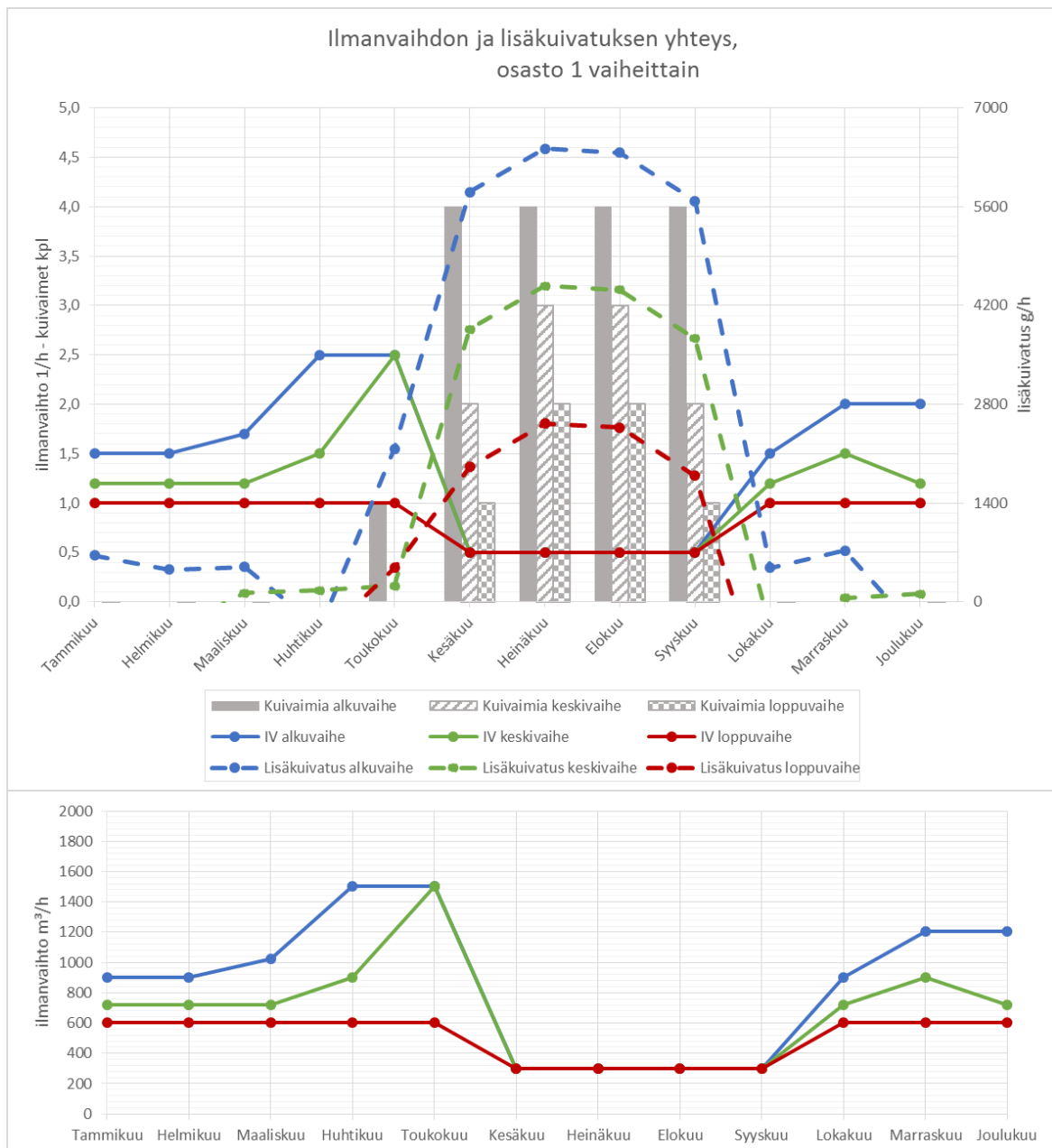
Edellä tarkastelun perusteella on siis aihetta jakaa kellaritila pienempiin kuivatettaviin osastoihin. Tätä diplomityötä varten kellaritila jaettiin kuuteen lohkoon kuvan 36 numeroinnin mukaisesti. Osastojako noudattaa täysin lopullista tilajakoa, joten sen toteuttami-

nen väliaikaisin ratkaisuin on mahdollista kohtuullisella työäärällä esimerkiksi väliaikaisia vaneriovia käyttäen. Haastetta aiheuttaa myös poisto- ja korvausilmareittien toteutus, jotka voidaan joutua toteuttamaan jopa erillisillä kanavarakenteilla. Rakennuksen lopulliset ilmanvaihtokanavat tarjoaisivat luonnollisen reitin, mutta käytännössä niiden käytön estää työmaalla syntyvä pöly. Kuivumisen aikaisessa ilmanvaihdossa on tärkeintä johtaa kostea ilma mahdollisimman tehokkaasti ulos sekä estää sen leviäminen viereisiin kuivatettaviin tiloihin. Tilojen kosteuskuorma vaihtelee työmaan eri vaiheissa suuresti: osa työvaiheista tuottaa lisäkosteutta, osa taas vaatii enemmän asennushenkilöstöä.



Kuva 36 Kellaritilan kuivatuksen lohkojako sekä tulo- ja poistoilmavirtojen reitit.

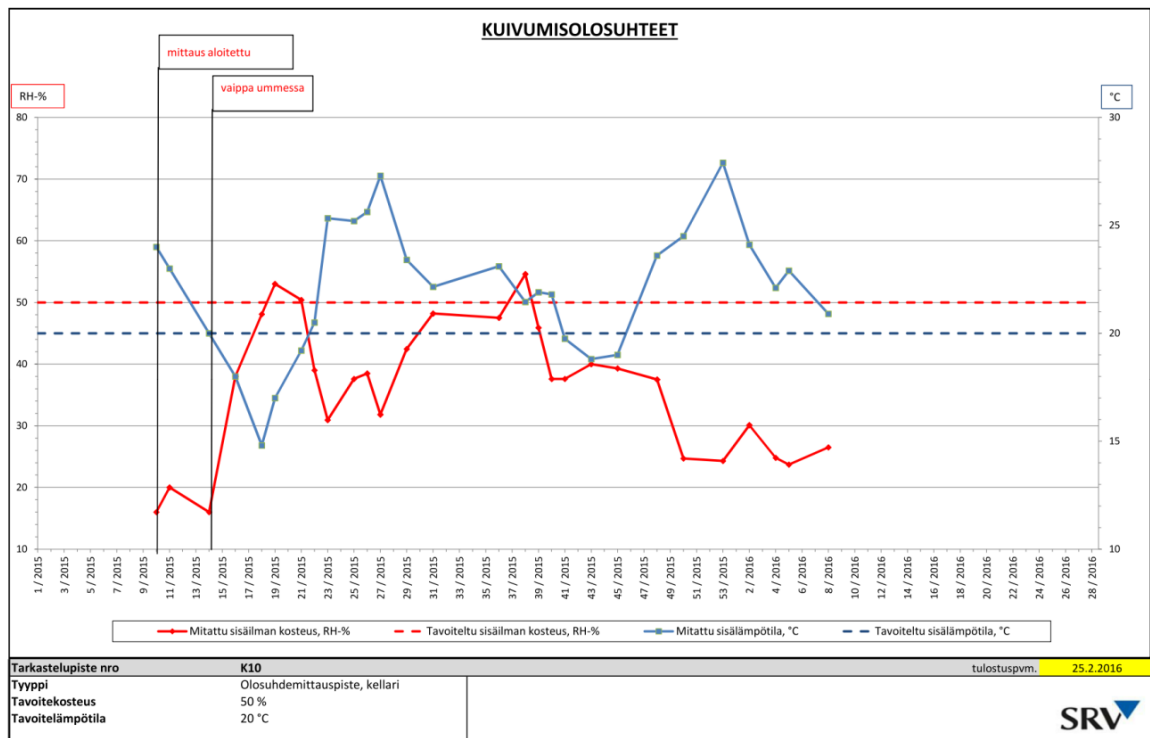
Lohkojaon jälkeen aiemmin esitetty ilmanvaihto- ja kuivuritarvelaskelma toistettiin erikseen kaikille kuudelle osastolle. Ohessa kuvassa 37 on esitetty laajimman osaston nro 1 ilmanvaihdon ja lisäkuivatuskaluston tarve. Kyseinen osasto on tilaosista pinta-alaltaan suurin ja siten kuvaa raskaimmin toteutettavaa kuivatusta. Laskelman kulku koko kellaritilan sekä osaston 1 osalta on esitetty liitteessä 5. Muiden osastojen kuivatustarve voidaan laskea vastaavasti lähtötietoja muuttamalla.



Kuva 37 Case-tutkimuskohteen kellaritilan osaston nro 1 kuivattamisen tarvittava ilmanvaihto sekä ilmankuivaimien tarve.

Tilojen osastoinnilla voidaan kohtuullistaa sekä ilmanvaihdon että tarvittavan ilmankuivatuksen määrää. Ohessa esitetyn mukaisesti alaltaan suurimmassa 1-lohkossa ilmanvaihto voidaan talvikuukausien aikana pitää 1,0 1/h ja 2,5 i/h välillä. Ilmanvaihtomäärinä tämä vastaa suurimmillaan 1500 m³/h eli 0,4 m³/s:n ilmamääriä. Nämä virtaukset on mahdollista saavuttaa yksinkertaisilla ja kooltaan kompakteilla kanavapuhaltimilla. Kesäkuukausina tilan kuivatus perustuu suurissa määrin kostedenerottimien käyttöön ja kostean ulkoilman tuomisen minimointiin. Varsinkin betonin kuivumisen alkuvaiheessa kosteustuoton ollessa suurimmillaan kosteuden lisäkuivatusarve on esimerkkiosastossa 1 noin 5600 g/h. Markkinoilla tyypillisesti käytettävillä kostedenerotintarvikkeilla tämä vastaa neljän laitteen käyttöä samanaikaisesti muodostaen siis suuressa mittakaavassa merkittävän kalustotarpeen. Vuokratuloina laitteisto on kuitenkin vain murto-osa projektin aikataulun viivästyksen mukanaan tuomasta taloudellisesta riskistä. Kellaritilan osastoinnilla voitiin näin ollen pienentää kuivatuskaluston kokonaistarvetta. Samalla myös poikkeustilanteisiin reagointi helpottuu hallittavan alueen koon ollessa pienempi.

Case-kohteessa kuivumisolosuhteita seurattiin säännöllisin olosuhdemittauksin. Käytännössä tämä toteutettiin kuivatettavan tilan sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksilla. Pääosin mittaukset suoritettiin porareikämittausten yhteydessä kosteusmittaajan toimesta. Tämän lisäksi varsinkin alkuvaiheessa kuivumisolosuhteiden vasta muodostuessa ilman mittauksia suorittivat myös työmaan päätoteuttajan henkilöstö. Olosuhteiden mittauspisteitä asetettiin mittaussuunnitelmassa tasaisesti kaikkiin kerroksiin huomioiden epäjatkuvuuskohdat, kuten suuret oviaukot tai ilmanvaihdon kannalta haasteelliset tilat. Kuivumisolosuhteita seurattiin kuvan 38 mukaisella taulukolla, jossa saatuja arvoja verrataan mittaushetkellä sisäilman tavoitearvoihin; lämpötila 20 °C, suhteellinen kosteus alle 50 %.



Kuva 38 Case-kohteessa käytetty kuivumisolosuhteiden seurantakäyrästä.

Käyrästä tulee päivittää aktiivisesti läpi hankkeen, jotta sen hyödyt saadaan täysmääräisesti käyttöön. Kuten kuvan seurantakäyrästä nähdään, on kyseisen tilan kuivumisolosuhteissa ollut paikoin suuriakin vaihteluita. Näille olosuhdevaihteluille löytyy monissa tapauksissa selkeät syy-seuraussuhteet, jotka case-työmaalla todettiin olevan esimerkiksi sääolosuhteiden vaihtelut, eri työvaiheiden aiheuttamat kosteusrasitukset sekä joissakin tapauksissa myös riittämätön lämmitys- ja kuivauskalusto.

Olosuhteiden tavoitearvot toimivat taulukossa eräänlaisena hälytysrajana, joiden ylittyessä työmaan tulee ryhtyä tarvittaviin toimiin kuivumisolosuhteiden normalisoimiseksi. Käytännössä nämä toimet ovat joko ilman lämmittämistä tai kuivaamista kappaleessa 8.2 esiteltyin toimin. Olosuhde- ja rakennekosteusmittaukset tukevat vahvasti toisiaan rakenteen kuivumisen seurannassa. Monissa tapauksissa pelkkiä olosuhdemuutoksia tutkimalla voidaan ennustaa myös kosteusmittaustulosten muutokset. Case-kohteessa kuivumisolosuhteiden seurantataulukko oli myös olennainen osa kosteudenhallintaraportointia.

8.4 Kuivumisen seuranta, pinnoitettavuusmittaukset sekä kosteudenhallintaraportointi

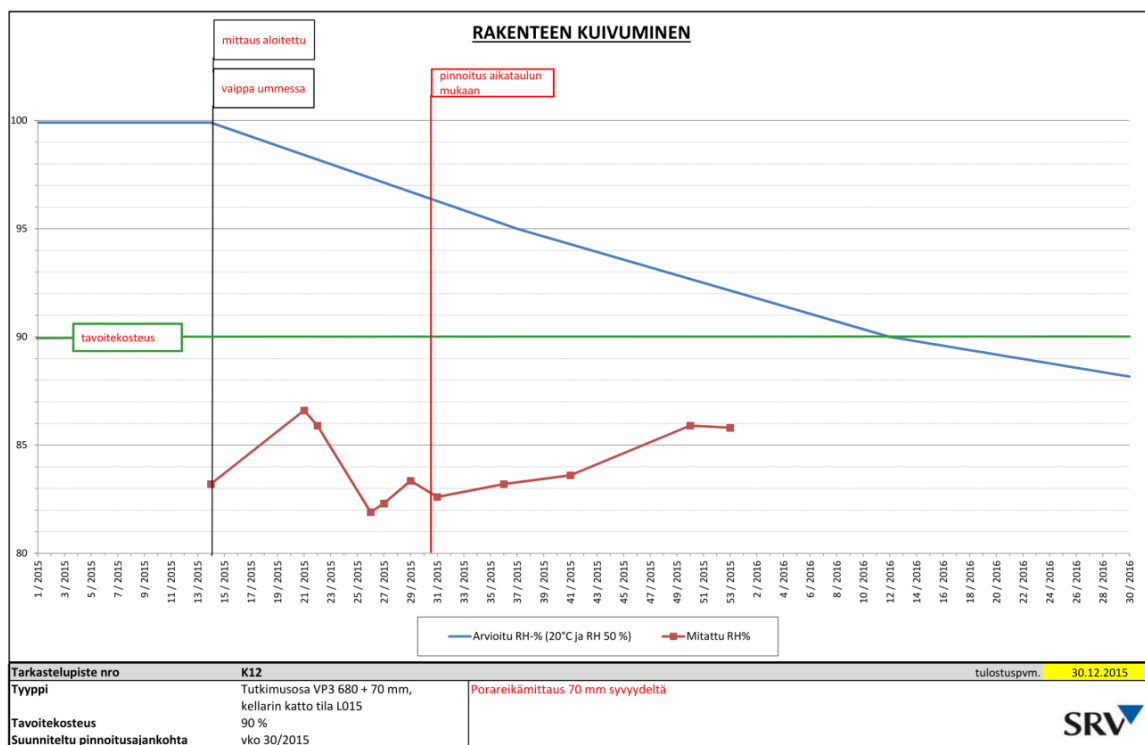
Kosteudenhallintasuunnittelun myötä tunnistettiin myös hankkeen tavallista suurempi kosteusmittausten tarve. Betonin suhteellisen kosteuden mittaamenetelmänä käytettiin Suomessa yleiseen tapaan porareikämittausta. Porareikämittaukset suoritettiin tämän diplomityön kappaleessa 7.1 kuvatun toimintatavan mukaisesti. Mittaukset suoritti työmaalla erillinen kosteusmittauksiin ja -kartoituksiin erikoistunut yritys, jonka mittaajat olivat VTT:n sertifioimia rakenteiden kosteuden mittaajia. Työmaalle nimetyt mittaajat suorittivat kaikki mittaukseen liittyvät vaiheet reiän poraamisesta ja tiivistämisestä varsinaiseen mittaukseen. Alustava mittausraportti laadittiin jo työmaalla, jolloin päätoteuttajan organisaatiolla oli heti mittauspäivänä tuore tieto kosteustilanteesta rakenteittain. Samalla mittaajat antoivat suusanallisesti näkemyksensä tilanteesta ja mahdollisista tarpeista parantaa kuivumisolosuhteita kussakin tarkastellussa tilassa. Jokaisesta mittauksesta laadittiin kirjallinen raportti työmaan tarkastusasiakirjan kosteudenhallintakansioon.

Kosteudenhallintasuunnitelman yhteydessä laadittiin kosteusmittaussuunnitelma, jossa esiteltiin käytettävät mittaukset sekä määritettiin alustavasti mittauspisteiden paikat ja määrät. Mittaussuunnitelmassa pisteiden sijoittelu tehtiin noudattaen kosteudenhallintasuunnitelmassa kriittisiksi määrättyjen rakenteiden jakoa. Peruseriaate mittauslaajuuden määrittämiselle oli seuraava:

- alkuvaiheessa kosteustietoa valulohkoittain
- kriittisiä rakenteita maanvastaiset seinät ja lattiat, dimensioiltaan massiiviset seinät ja välipohjat
- tiiviiden pinnoitteiden alueet, kuten epoksimaalaukset ja märkätilojen vedeneristykset
- alueet, joiden tarkkailu ja huolto ovat käyttöaikana vaikeaa, esim. suurten kiintokalusteiden ja laitteiden taustat

Jokaiselle mittauspisteelle annettiin jäljitettävyyden varmistamiseksi yksilöllinen tunnisteen, joka seurasi pistettä läpi hankkeen ja kaikkien suoritettujen mittausten. Luonnollisesti mittausta ei joka kerta voitu suorittaa täysin samasta kohtaa mittausalueella. Käytännössä tämä tarkoittikin porareikää noin kahden neliömetrin alueella alkuperäisestä mittauskohdasta. Tavallisesta hankkeesta poiketen case-työmaalla mittauksia suoritettiin betonilattioiden lisäksi reilusti myös seinä- ja kattopinnoista. Mittaussuunnitelmaa pidettiin ajan tasalla mittausten edetessä. Samalla myös lisättiin tarpeen mukaan kosteusmittauspisteitä työmaan pinnoitustöiden vaiheistuksen mukaisesti. Tämä johti pieneen kasvuun kosteusmittauspisteiden kokonaismäärässä.

Työmaatoteutuksen kannalta toimivaksi osoittautui mittausten tekeminen kuivumisen alkuvaiheessa harvemmin ja laajemmille alueille, jonka jälkeen pinnoitusajankohdan läheisyydessä mittauspisteiden määrää lisättiin tila- ja aluekohtaisiksi. Työmaan aikana havainnointiin lisäksi mahdollisia kosteampia alueita ja asetettiin näihin oma seurantapisteenä. Kriittisten rakenteiden osalta mittauksia tehtiin 1,5-2 viikon välein. Yksittäisiä tarkastusmittauksia lukuun ottamatta kaikki mittaukset tehtiin virhemarginaalin pienentämiseksi uusista porareikistä. Kuivumisen olosuhdemittauksia vastaavasti myös saadut rakennekosteusmittaustulokset kerättiin oheisessa kuvassa 38 esitettyyn käyrästön.



Kuva 39 Case-kohteessa käytetty rakennekosteuden kuivumisen seurantakäyrästä / porareikämittausten raportointiväline.

Taulukko laadittiin jokaisesta mittauspisteestä ja yksilöitiin kosteusmittaussuunnitelmaa vastaavin tunnuksin. Kuivumisen etenemistä seurattiin rinnan rakennesuunnittelijan Merikallion julkaisun Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi mukaan laati-
mien kuivumisaika-arvioiden kanssa. Arviota kuvaa seurantakäyrästä sinisellä värillä
oleva viiva. Vertailun avulla pystyttiin tunnistamaan nopeasti mahdollinen kuivumisen
hidastuminen tai poikkeustilanteessa rakenteen suhteellisen kosteuden nousu. Yhdessä
olosuhdeseurannan kanssa voitiin reagoida tilanteeseen tarvittavilla lisäkuivatus- ja läm-
mistysoimilla. Lisäksi taulukkoon on merkitty rakennekohtaisesti määritelty betonin suhteelli-
sen kosteuden raja-arvo, jonka saavuttamisen jälkeen pinnoituksen suoritus on mahdolli-
nen. Kokonaisuuden hahmottamiseksi merkittynä ovat myös aikataululliset pakkopisteet.

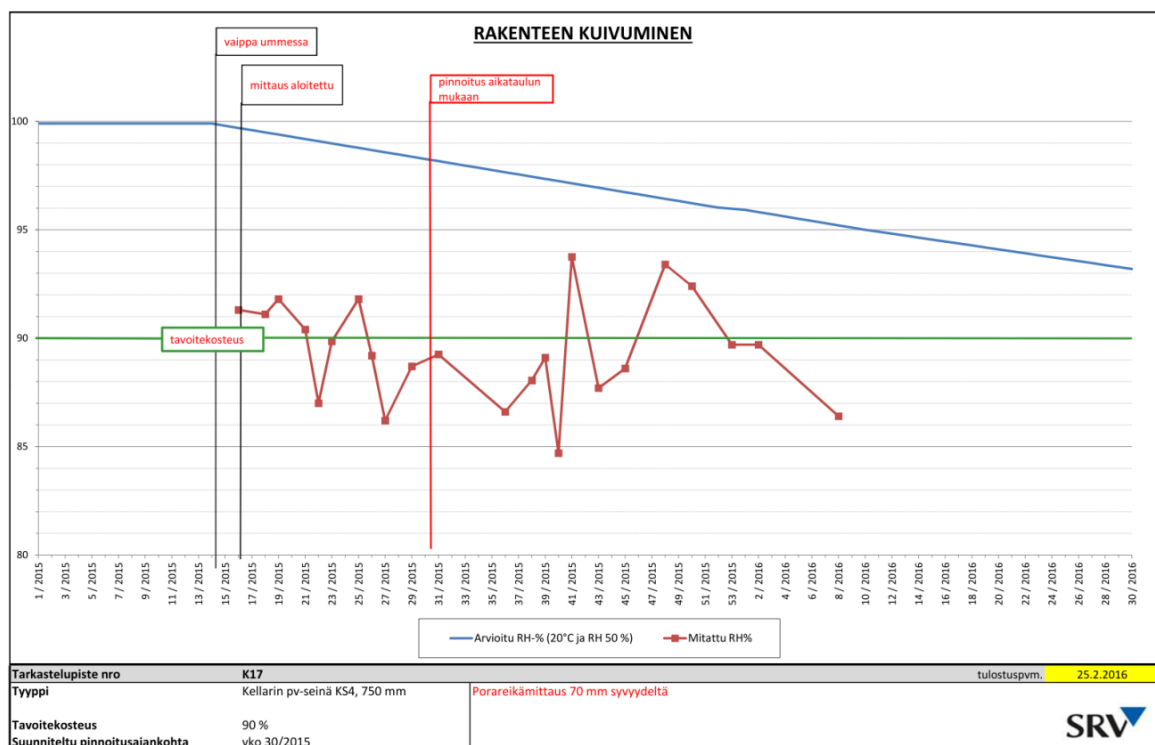
Kuvan 39 tapauksessa rakenteen betonoinnin ja mittausten aloittamisen välinen aika on
suuri, joten kuivumista on jo ehtinyt suuressa määrin tapahtua. Toisin sanoen sininen kui-
vumisaika-arviota kuvaava käyrän nollapiste on kyseessä olevan rakenteen ja kuivatettavan
tilan kannalta asetettu liian myöhäiseen ajankohtaan. Punaisessa kuivumiskäyrässä näkyy
myös kuivumisen suuri olosuhderippuvaisuus ja etenkin porareikämittausten herkkyy-
s. Nämä tekijät aiheuttavat käyrään pientä vaihtelua, joka pysyy kuitenkin mittaukselle tyy-
pillisen vaihteluvälin piirissä.

Taulukko toimi työmaatoteutusta ohjaavana tekijänä esittäen kuivumistilanteen riittävällä
tarkkuudella. Lopullisen pinnoitusluvan kriittisille rakenteille antoi yhtenä kohteen koste-
usteknisenä asiantuntijana toiminut rakennesuunnittelija. Varsinaisia mittaukseen liittyviä
epävarmuustekijöitä sekä kosteudenhallinnan tilannetta yleisesti käsiteltiin kahden viikon
välein laadituissa työmaan kosteudenhallintaraporteissa. Lisäksi työmaatoiminnassa pora-
reikämittausten RH-tuloksia arvioitiin aina rinnan mittauksessa todettujen lämpötilojen
kanssa. Näin voitiin todeta mahdolliset suuremmat virhemarginaalit ja toisaalta parantaa
kuivumisolosuhteita paremmiksi.

Työmaalla toteutettiin lukumäärällisesti paljon kosteusmittauksia keskittyen erityisesti paksuja rakenteita käsittävään kellaritilaan. Lukuisten mittausten tuloksiin sisältyy myös erinäisistä syistä johtuvia virheitä. Nämä virheet on käsitelty kosteudenhallintaraportoinnissa sekä huomioitu pinnoituskelpoisuutta arvioitaessa. Case-työmaalla tunnistettiin erityisesti dimensioiltaan paksujen rakenteiden porareikämittausten haastavuus. Ensinnäkään yleisessä käytössä olevat rakenteen kuivumisen arviointimenetelmät eivät suoraan käsittele erityisen paksuja rakenteita. Myös porareikämittauksen kannalta paksut rakenteet aiheuttavat haastetta. Toisaalta mittausta tulisi tehdä yleisen rakennustavan mukaisesti RT-kortin ohjeiden mukaisesti, toisaalta ohjekortin mukainen 70 mm maksimimittaussyvyys vastaa vain noin kymmenen prosentin osuutta rakenteen kokonaispaksuudesta.

Case-kohteessa paksuista rakenteista saadut mittaustulokset vaihtelivat mittauskertojen välillä voimakkaasti, ollen herkkiä erityisesti kuivumisolosuhteiden muutoksille. Alapuo-
lella kuvan 40 käyrästä on esitettyä kellarin 750 mm paksun väliseinän kosteusmittaustulokset. Mittaustuloksissa on voimakasta vaihtelua jopa kahden viikon välein suoritettujen mittausten välillä mukaillen kuitenkin porareikämittaukselle tyypillisen virhemarginaalin ääriarvoja. Toisaalta keskiarvoinen suhteellisen kosteuden lukuarvo pysyy kutakuinkin samassa tasossa.

Kuvan 39 tapaan myös oheisesta seurantakuvaajasta voidaan todeta kuivumisaika-arviokäyrän ajallisen nolлахetken valinnan haasteellisuus. Esimerkkitapauksissa kuivuminen on mittaustulosten perusteella alkanut jo reilusti ennen vaipan ummistusta ja kuivumisolosuhteiden saavuttamista. Kyseisessä mittauspisteessä seurantamittaukset olisivat olleet syytä aloittaa aiemmin, jopa heti betonointia seuranneina viikkoina. Tällöin kuivumisen nolлахetki olisi tarkasti tiedossa. Kuvan 40 tapauksessa arviokäyrä antaa lisäinformaatiota lähinnä kulmakertoimensa avulla.



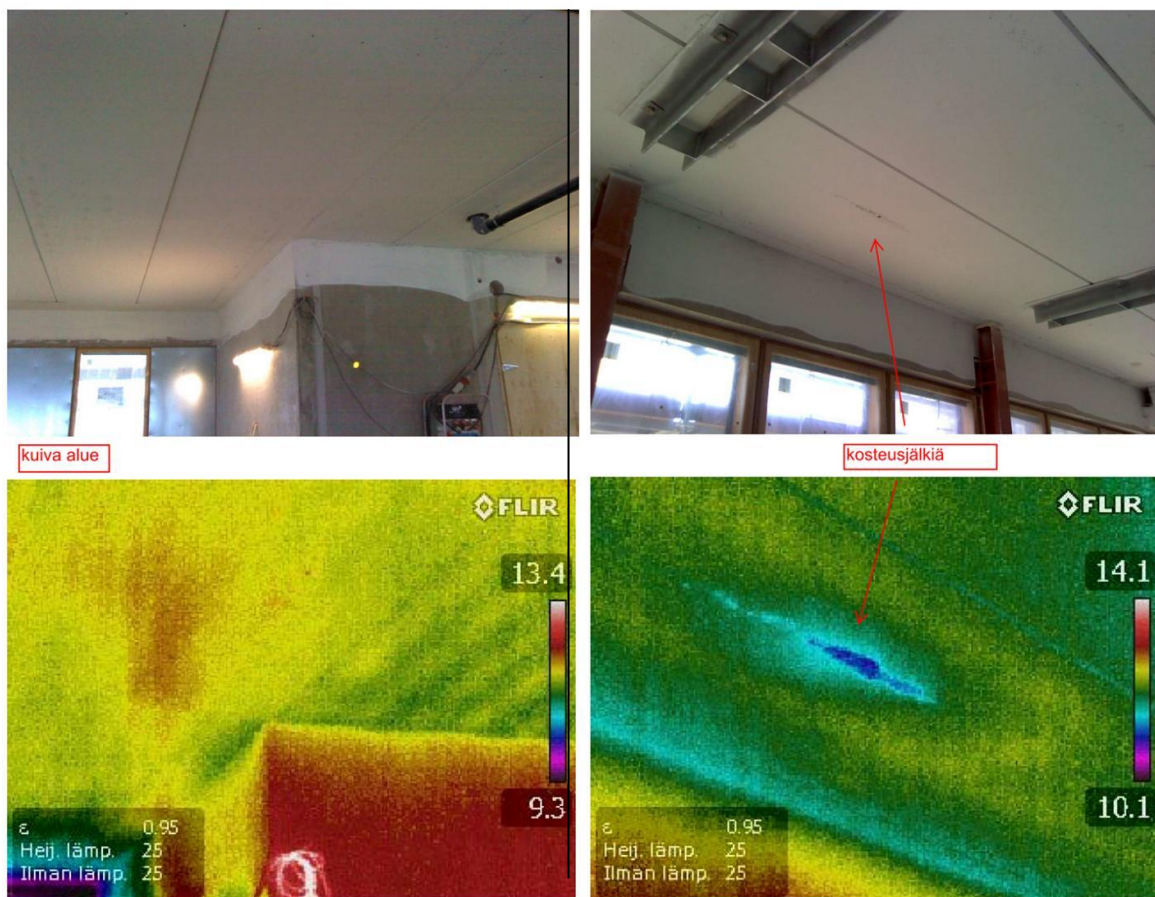
Kuva 40 Case-kohteen paksujen paikallavalseinien kuivumisen seurantakäyrä.

Haasteet kosteusmittauksissa vaikuttivat osaltaan siihen, että kohteen paksuista rakenteista teetettiin kosteusteknisellä konsultilla erillislaskelmia ja -tarkasteluja. Saadut porareikä-

mittausten suhteellisen kosteuden tulokset toimivat näissä tarkasteluissa laskennallisen simuloinnin lähtötietoina. Vastaavia kosteusmittaustulosten heittelyitä ei todettu kohteen tavanomaisen rakennepaksuuden omaavissa mittauspisteissä.

Kohteen elementtirakenteissa sekä näihin liittyvissä pintabetonilaatoissa pinnoitettavuus varmistettiin niin ikään porareikämittauksin. Mittausdataa seurattiin paikallavalurakenteiden tavoin omissa mittauspistekohtaisissa taulukoissaan. Kohteen ontelolaattarakenteiden osalta kosteudenhallinnan kannalta kriittiseksi tekijäksi määritettiin pinnoitettavuuden ohella myös onteloihin rakennusaikana kertyneen veden poistaminen.

Veden poistumisen varmistamiseksi ontelolaattoihin porataan jo elementtitehtaalla vedenpoistoreiät. Asennuksen ja saumavalun jälkeen tehtaan reikien avonaisuus varmistettiin työmaalla, jonka lisäksi porattiin lisäreikiä tarpeellisessa määrin. Rakennusvaipan ummistamisen jälkeen ontelolaatastot kierrettiin holvin alapuolelta läpi lämpökameran avulla. Lämpökamerakuvauksessa muuta holvia kylmemmät osat oletettiin sisältävän vettä. Alla olevassa kuvassa 41 on esitetty esimerkkinä lämpökamerakuvauksessa havaittu poikkeama. Tällä menetelmällä rajattuja poikkeama-alueita otettiin kuivumisen kannalta erityisseurantaan ja onteloiden kohdalle porattiin edelleen lisäreiät veden poistumisen varmistamiseksi. Käyttövaiheen osalta varmin tapa on jättää onteloiden vesireiät avoimiksi. Casekohteessa tämä ei akustisista vaatimuksista johtuen ollut mahdollista.



Kuva 41 Case-kohteessa lämpökameralla suoritettuja ontelolaattojen onteloiden vesitarkastuksia. Vasemmalla kuiva alue, oikealla jatkoseurantaan otettu alue. (27)

Kosteudenhallintaprosessin etenemistä raportointiin työmaalta hankkeen eri osapuolille kahden viikon välein erillisin kosteudenhallintaraporttein. Raporteissa listattiin raportointivälillä suoritettavat erityiset kosteudenhallintatoimet, kosteusmittaukset sekä mahdolliset

poikkeamat kosteudenhallinnassa ja näiden korjaavat toimet. Olennaisena osana kosteudenhallintaraportissa arvioitiin myös suhteellisen kosteuden porareikämittauksissa esiin tulleita asioita, kuten kuivumisolosuhteita sekä mittausten epävarmuustekijöitä. Raportit ovat osa työmaan tarkastusasiakirjakokonaisuutta.

9 Tutkimustulokset ja niiden arviointi

9.1 Johtopäätökset

Kosteudenhallinta muodostaa merkittävän osan rakennushankkeen laadunvarmistuksessa sekä lopputuotteen terveellisyysvaatimuksen osatekijänä. Kosteudenhallintaprosessi on koko hankkeen kestävä kokonaisuus, joka täydentyy hankkeen edetessä jatkuvassa kanssakäymisessä muun suunnittelun ja toteutuksen kanssa. Kosteudenhallinnan epäonnistuminen korottaa kosteus- ja homevaurion riskiä rakennuksen käyttöaikana. Työmaa-aikaisen kosteudenhallintaprosessin tärkeänä osana on rakennekosteuden minimointi ja kuivattaminen. Tyypillisin rakennekosteutta sisältävä rakennusmateriaali on betoni, erityisesti paikallavallettuna. Työmaalla tulee tällöin huolehtia betonin kuivattamisesta, kuivumisen seurannasta sekä kosteustilan todentamisesta.

Työmaan kosteudenhallintasuunnitelman osana laaditaan rakennekohtaiset kuivumisaikaarviot. Näiden arvioiden pohjalta voidaan tunnistaa aikataulullisia reunaehtoja sekä toisaalta määrittää kosteudenhallintaprosessin erikoisvalvottavia kokonaisuuksia. Kuivumisaika-arvioista työmaaorganisaation käyttöön soveltuu erityisesti julkaisussa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi (19) esitetty menetelmä. Kyseinen arviointitapa on yksinkertaisuudestaan huolimatta moniin eri rakennustyyppisiin soveltuva sekä ottaa huomioon kattavasti eri hankkeiden erityispiirteitä.

Kuivattaminen on pääsääntöisesti rakennetta ympäröivän sisäilman hallintaa ilmanvaihdolla, lämmittämällä tai kuivattamisella, jotta saavutetaan betonin kuivumiselle otolliset olosuhteet: lämpötila yli 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus alle 50 %. Tärkeintä on varmistaa, että sisäilmalla on kyky vastaanottaa rakenteesta vapautuvaa kosteutta. Suomen olosuhteissa tämä tarkoittaa lisälämmitystarvetta talvikuukausina sekä ilman kuivattamista kesällä ja alkusyksystä. Kuivattamistoimien ennakointi on työmaan kosteudenhallintatoimien perusta yhdistettynä tarpeelliseen aukko- ja sääsuojaukseen.

Ennen betonin pinnoittamista tulee rakenteen kosteustila aina todeta erillisin kosteusmittauksin. Porareikämittaus on menetelmästä Suomessa yleisimmin käytössä oleva. Porareikämittaukseen tulee sen yleispätevyydestä huolimatta suhtautua tietyin varauksin. Menetelmä on herkkä sekä olosuhteista että mittaussuorituksesta johtuville virheille. Mittaustuloksia tulee aina tarkastella kokonaisuutena ottaen huomioon kaikki mahdolliset virhelähteet. Epäonnistunutkin mittaus voi toimia työmaan apuvälineenä esimerkiksi kuivumisolosuhteiden parantamisessa.

Tämän diplomityön tuloksena muodostettiin kohdeyrityksen käyttöön tarkastuslista työmaan kosteudenhallinnan ja erityisesti rakennekosteuden kuivattamisprosessin tueksi. Esi-
tettynä on muistilistamaisesti kuivattamisen kannalta kriittisiä tekijöitä, olosuhteidenhallinnan lähtökohtia sekä kosteusmittauksen pääkohtia. Prosessikuvauksesta on pyritty tekemään mahdollisimman moniin eri rakennustyyppisiin ja olosuhteisiin soveltuva, jolloin se toimii kosteudenhallinnan tukena laajasti myös erilaisilla työmailla. Rakennekosteuden kuivatus

ja betonin pinnoittamiskelpoisuuden varmistaminen ovat koko hankkeen kestäviä toimia, joten niiden tulee olla alusta alkaen selkeästi vastuutettuja ja dokumentoituja.

Kosteudenhallinnassa olennaista on hyvien käytäntöjen laaja levittäminen. Kosteusperäisissä rakentamisen ongelmissa syyt ovat usein hankkeesta toiseen toistuvia, mikä on osaltaan syynä valtakunnallisesti merkittävään kosteus- ja homeongelmien määrään. Tehokkaalla laatutoiminnalla sekä tietojen vaihdolla toistuvat ja tietyille rakennus- tai rakennetyypille tyypilliset virheet voidaan minimoida. Riskirakenteet voidaan jättää kokonaan tekemättä tai niitä voidaan vähintäänkin kehittää toimivammiksi. Kuten rakentamisen laatutoiminnassa yleensä, on kosteudenhallinnan osaltakin virheistä oppiminen erityisen tärkeää.

9.2 Jatkokehitys- ja tutkimustarpeet

Rakennushankkeen kosteudenhallintaan liittyvät kehitystarpeet koskevat erityisesti prosessin liittämistä osaksi rakentamisen kokonaisuutta. Kosteudenhallinta mielletään nykyisin liiaksi muusta rakentamisesta erilliseksi toiminnaksi. Joissakin tapauksissa sen merkitystä jopa vähätellään tai jätetään niukkojen resurssien vuoksi omaan arvoonsa. Kyseessä on kuitenkin läpi hankkeen jatkuva ja kehittyvä prosessi, joka alkaa rakennuttamisen alussa jatkuen aina käytönaikaiseen toimintaan.

Betonin rakennekosteuden kuivattamisen kannalta merkittävien jatkotutkimustarpeet liittyvät paitsi itse kuivumisprosessiin myös kuivumisarvioiden tarkkuuteen sekä kosteusmittaustapojen jatkokehitykseen. Tällä hetkellä yleisessä käytössä olevat menetelmät eivät ota huomioon kaikkia nykyrakentamisen lähtökohtia tai ulkoisia tekijöitä. Näistä esimerkkeinä uudet betonin lisäaineet ja sementit, tiiviit rakenteet sekä ilmastossa tapahtuvat muutokset. Työmaatoiminnassa kuivuminen tulisi mieltää aiempaa vahvemmaksi laadulliseksi sekä aikatauluttavaksi tekijäksi. Kuivumisen varmistamiseksi tulisi työmaan laadunhallinnassa nimetä erillinen kosteusasioista vastaava henkilö, joka huolehtii koko kuivattamisprosessin ohjaamisesta, seurannasta sekä raportoinnista.

Kehittämistarvetta on sääolosuhteiden huomioimisessa kuivumisaika-arvioiden ja kuivausolosuhteiden ennakkosuunnitelmien laadinnassa. Ilmastomuutoksen myötä myös Suomessa tyypillinen säätila tulee muuttumaan. Samalla tulisi päivittää myös kosteudenhallinnan prosesseja sekä erityisesti rakennekosteuden kuivatuksessa käytettävän ulkoilman hallintaan liittyviä toimintatapoja. Ilmaston lämmetessä ja kosteiden ajanjaksojen venyessä ilmaa joudutaan entistä enemmän kuivaamaan koneellisesti. Tämä johtaa myös aiempaa tarkempaan aukkosuojaukseen ja osastointiin työmaalla.

Työmaahenkilöstön tulisi aiempaa paremmin ymmärtää betonin kuivattamiseen ja erityisesti kosteusmittauksiin liittyvät muuttujat ja lukuisat epävarmuustekijät. Kosteusmittaus ei anna kaikissa tilanteissa ja olosuhteissa absoluuttisesti oikeaa tietoa rakenteen kosteustilasta, vaan mittaustuloksia tulee aina arvioida mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät huomioon. Näistä merkittävimpiä ovat mittalaitteen ominaisuudet, mittauksen suorittaminen sekä mittaushetkellä vallinneet olosuhteet. Yleisesti käytettyyn porareikämittaukseen liittyvistä epävarmuustekijöistä tulisikin pyrkiä eroon pysyvästi rakenteeseen asennettavia mittalaitteita kehittämällä. Tällä tavoin mittausvarmuuden paranemisen lisäksi saavutetaan myös rakennetta rikkomatta reaaliaikainen kosteustilan seuranta. Laitteita on jo markkinoilla, mutta niiden osalta kaivataan työmaaympäristössä lisää käyttökokemusta.

10 Yhteenveto

Rakennusten kosteus- ja homevauriot aiheuttavat Suomessa nykyisellään sekä merkittävää terveydellistä että taloudellista haittaa. Vauriot altistavat satoja tuhansia ihmisiä terveydelle haitallisille vaikutuksille niin asuin- kuin työpaikoillakin. Näiden vaurioiden korjauksiin käytetään jo nykyisellään vuosittain satoja miljoonia euroja korjausvelan kasvaessa jatkuvasti. Kosteus- ja homevauriot ovat yleensä seurausta epäonnistuneesta suunnittelu- ja rakentamisprosessista. Samalla ei ole onnistuttu täyttämään lainmukaista rakennuksen terveellisyyden ja turvallisuuden olennaista vaatimusta.

Rakennushankkeen onnistuneella kosteudenhallinnalla vauriot voidaan estää ennakolta jo rakentamisaikavaiheessa. Kosteudenhallinta muodostaakin koko rakentamishankkeen kestävä prosessin, joka jatkuu huollon ja käytön aikaisena toimintana koko rakennuksen elinkaaren ajan. Prosessia täydennetään vaiheittain rakennuttamistoimien aloittamisesta lähtien. Kokonaishallinnan kannalta olennaista on määritellä kosteudenhallinnan tavoitetaso, vaatimukset sekä hankkeen kosteustekninen riskitaso ja haastavuus. Nämä tekijät ovat aina hankekohtaisia ja voivat vaihdella suurestikin muun muassa rakennuksen sijainnin, muodon ja käyttötarkoituksen mukaan. Suunnittelun, rakentamisen ja ylläpidon tulee omilla toimillaan täyttää nämä rakennuttajan asettamat vaateet. Kosteudenhallinnan toimenpiteiden tulee olla jatkuvia, koko hankkeen ajan ohjaavia tekijöitä. Rakentamisen työmaavaihetta ohjaa erityisesti hankekohtaisesti laadittu kosteudenhallintasuunnitelma, jossa kuvataan konkreettisesti työmaatasolla tehtävät laadunvarmistuksen keinot, joita kosteusteknisesti toimivan rakennuksen toteuttaminen vaatii.

Osaan rakenteista sitoutuu niiden valmistamisen yhteydessä rakennekosteutta, tyypillisimpänä esimerkkinä betonin kosteus. Betonin kuivattamisen määrä riippuu kunkin pinnoite- ja päällystemateriaalin kosteuskestävyydestä. Vaadittava alusbetonin suhteellisen kosteuden raja-arvo vaihtelee yleisesti 85 ja 97 prosentin välillä. Lopullisen materiaali-kohtaisen suositusrajakosteuden antaa tuotevalmistaja. Niin sanotun betonin normaalin rakennekosteuden lisäksi työmaaorganisaation tulee yhdessä suunnitteluryhmän kanssa tunnistaa mahdolliset lisäkuormittavat tekijät ja minimoida näiden vaikutus kosteudenhallintatoimin. Liian kostealle betonille pinnoittaminen sisältää aina riskin merkittävästä home- ja kosteusvauriosta, emissioita aiheuttavasta kemiallisesta reaktiosta tai pinnoitteen hajoamisesta ja irtoamisesta. Toisaalta rakennekosteuden raja-arvoa ei saa määrittää vaurioriskin liiallisen minimoimisen vuoksi liian alhaiselle suhteellisen kosteuden tasolle, jotta välttytään tarpeettomilta aikatauluviiveiltä ja näistä yleensä seurauksena olevalta hankekustannusten nousulta.

Rakenteen kuivumisaikaa voidaan arvioida erilaisilla laskennallisilla menetelmillä, joista monet ovat riittävän yksinkertaisia ja nopeita myös työmaan tuotannon suunnittelun ohessa laadittaviksi. Kuivumiseen vaikuttavat olennaisesti kuivumissuuntien määrä, betonimassan ominaisuudet, erityisesti vesi-sementti-suhde, rakenteen paksuus sekä työmaan kuivumisolosuhteet. Olosuhteiden osalta tehokkaan kuivumisen edellyttämä minimilämpötila on +20 °C ja maksimissaan 50 prosentin suhteellinen kosteus. Näiden raja-arvojen ylittyessä kuivuminen hidastuu merkittävästi. Työmaan asianmukaisten olosuhteiden varmistaminen onkin betonin rakennekosteuden kuivatuksen kannalta oleellista. Kuivumistarvetta voidaan arvioida yksinkertaisilla laskennallisilla menetelmillä, jolloin tarvittavan kaluston varaaminen työmaalle helpottuu. Samalla kuivattamisesta tulee suunnitelmallisempaa ja olosuhdemuutoksiin reagoiminen on helpompaa. Runkovaiheen ja vaipan ummistamisen jälkeen kyseessä on ennen kaikkea kuivatettavan tilan sisäilman hallintaan liittyvät seikat: ilmanvaihdon varmistaminen, ilman lämmittäminen tarvittaessa sekä ilman kuivattaminen tarvit-

taessa. Yksinkertaistaen ulkoilmasta otettavaa korvausilmaa joudutaan talviaikaan lisäämättämään, kun taas kesällä ja alkusyksyllä tarvetta on ilman koneelliselle kuivattamiselle. Tilannekohtaisesti tiloja tulee kuivatuksen aikana osastoida pienemmiksi ja helpommin hallittavissa oleviksi kokonaisuuksiksi.

Erilaisista rakennekosteuden kuivumisaika-arvioista huolimatta rakenteen todellinen kosteustila tulee aina varmistaa työmaalla tehtävin kosteusmittauksin. Mittausten määrä ja sijoittelu esitetään työmaan kosteudenhallintasuunnitelmaan liitettävässä mittaussuunnitelmassa. Todentamipaikkoja tulee valita riittävästi sekä edustavista paikoista. Mahdollisia erityisen rankalle kosteusrasitukselle joutuneita rakenteita voidaan ottaa erillistarkkailuun. Yleisesti käytössä on kolme eri mittausmenetelmää: porareikämittaus, koepalamenettelmä sekä rakenteessa olevat sähköiset mittaukset. Näistä porareikästä tapahtuva suhteellisen kosteuden mittaus on selvästi suosituin sekä monissa tapauksissa ainoa hyväksytty menetelmä. Porareikämittauksessa rakenteeseen porataan reikä halutulle, rakenteen paksuudesta riippuvalle tarkastelusyvyydelle. Porattu reikä tiivistetään mittaputkella, kitillä ja tulpalla noin 3-5 vuorokautta pitkän tasaantumisen ajaksi. Tämän jälkeen porareikän pohjan kosteustila todetaan sähköisellä mittalaitteella sekä raportoidaan asiaankuuluvasti mittauksen kaikki tekijät huomioiden.

Porareikämittaukseen liittyy eri tekijöistä johtuen suuria virhemahdollisuuksia, jotka tulee parhaan mukaan sulkea pois ennen mittauksen suorittamista. Työmaaoiloissa suurimmat mittaustarkkuutta heikentävät tekijät ovat olosuhteiden lisäksi mittauksen suorittamisen laatu. Mittaukset tulisi aina suorittaa kalibroiduin välinein, riittävän pätevyyden omaavan mittajan toimesta. Rakennushankkeen kosteudenhallinnassa dokumentoinnin ja raportoinnin rooli on merkittävä. Kaikki tieto tulee olla huolellisesti ylös kirjattuna, jotta mahdollisten poikkeamien vaikutus voidaan käytönaikana todeta.

Rakennekosteuden kuivuminen on ilmiönä monimutkainen ja sen kestoon vaikuttavat lukuisat tekijät. Osa näistä tekijöistä on työmaatoiminnan vaikutuksen ulkopuolella, kuten lujuuden määrittämät rakennepaksuudet tai maanvastaisten rakenteiden tarve. Kuivumisen lukuisista muuttujista osaan työmaalla voidaan kuitenkin vaikuttaa työnsuunnittelulla ja olosuhdehallinnalla. Epäonnistuneilla työmaan toimilla kuivuminen voi hidastua tai lakata kokonaan. Pahimmassa tapauksessa rakenne alkaakin kuivumisen sijaan kerätä lisää kosteutta sisäilmasta. Kuivumiseen vaikuttavat tekijät tulee tiedostaa rakentamisen aikana ja huolehtia kuivumisedellytysten ylläpidosta.

Diplomityön tuloksena on esitetty kosteudenhallinnan ja rakennekosteuden kuivattamisen prosessikuvaus kohdeyrityksen käyttöön. Prosessi on korostetun monipuolinen ja siinä on liittymäkohtia kaikkiin hankkeen osapuoliin rakennuttamisesta ja suunnittelusta aina tulevan käyttäjän toimintaan. Työmaaolosuhteiden rooli on kosteudenhallinnan ja kuivatuksen kannalta olennainen. Kaikkia toimia ohjaa hankekohtaisesti laadittu kosteudenhallintasuunnitelma, johon osapuolet yhteisesti sitoutuvat.

Lähdeluettelo

- 1 Merikallio, T. (2009) Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. 136 s. ISBN 978-951-22-9957-7 (PDF).
- 2 RIL 250-2011 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. (2011) Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 243 s. ISBN 978-951-758-537-8.
- 3 Reijola, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E. & Reiman, M. (2012) Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. Eduskunta. 206 s. ISBN 978-951-53-3455-8 (sähköinen).
- 4 Haapaniemi, M. (2014) Vuotovahinkoselvitys 2012-2013. Helsinki: Finanssialan Keskusliitto. 52 s. Käyty 15.12.2015. http://www.finanssiala.fi/vahingontorjunta/dokumentit/vuotovahinkoselvitys_2013.pdf
- 5 Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=maank%C3%A4ytt%C3%B6ja%20rakennuslaki>
- 6 Seppälä, P. (2013). Rakentamisprosessin kosteudenhallinta – rakennuttajan laatuvalinnan, suunnittelu, työmaatoteutus ja ylläpito. Oulu: Oulun yhdyskunta- ja ympäristöpalvelut / rakennusvalvonta. Käyty 24.9.2015. <http://www.ouka.fi/documents/486338/37b496fa-5e69-411d-91f8-f0a45482b291>
- 7 Merikallio, T., Niemi, S., Komonen, J., (2007) Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. Helsinki: Betonikeskus ry. 102 s. ISBN 978-952-5075-88-5.
- 8 Viitanen, H. (2004). Betonin ja siihen liittyvien materiaalien kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto. Espoo: VTT, 25 s. ISBN 951-38-6558-4.
- 9 Sisäilmayhdistys ry, Maanvastainen betonilaatta. Käyty 15.02.2016. <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Maanvastainen-betonilaatta>.
- 10 Eronen, J., Räsänen, V., Wirtanen, L., Penttala, V., (1998) Päällystettyjen betonilattioiden emissiot. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto, rakennusmateriaalitekniikka, Julkaisu 8. 36 s. ISBN 951-22-4282-6.
- 11 Sisäilmastoluokitus 2008. RT-kortti 07-10946. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS sr. 22 s.
- 12 Sisäilmastoluokitus 2000. RT-kortti 07-10741. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS sr. 19 s.

- 13 Jäteri. J. (2008) Sisäilmastoluokitus 2008, Sisäympäristön uudet tavoitearvot. PDF-muotoinen julkaisu, käyty 5.3.2016 <http://whm12.louhi.net/~sisailma/wp-content/uploads/2013/03/sisailmastoluokitus2008-esittely.pdf> .
- 14 Tuomi, T., Lappalainen, L.; Laaja, T., Hovi, H., Svinhufvud, J. (2012). Haihtuvien orgaanisten kokonaispitoisuuden (TVOC) tavoitetasot teollisten työympäristöjen yleisilmassa, Helsinki: Työterveyslaitos. 10 s. www.ttl.fi/tavoitetasot .
- 15 Betonirakentamisen laatuohjeet 2013, BY 47. (2013) Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y. 140 s. ISBN 978-952-67169-7-8.
- 16 SisäRYL 2013 Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset. Talonrakennuksen sisätyöt. (2013) RT-kortti 14-11103, Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS. 352 s. ISBN 978-952-267-028-1.
- 17 Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet. (2007) Helsinki: Betonikeskus ry. 47 s. ISBN 978-952-5075-89-2.
- 18 West, R P., Holmes. N. (2005) Predicting moisture movement during the drying of concrete floors using finite elements. Construction and Building Materials. Vol 19:9. s. 674-681. ISSN 0950-0618
- 19 Merikallio T. (2002) Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Helsinki: Betonikeskus ry. 62 s. ISBN 952-5075-45-1.
- 20 Hedenblad G. (1997) Drying of Construction Water in Concrete. Tukholma: Swedish Council for Building Research, 54 s. ISBN 91-540-5785-X.
- 21 Björkholtz D. (1990) Rakennuksen kuivattaminen. Helsinki: Suomen Rakennusteollisuusliitto ry, 76 s. ISBN 951-676-492-4.
- 22 Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J., Karlsson, P. & Ruuhela, R. (2012) Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Helsinki; Ilmatieteen laitos, 96 s. ISBN 978-951-697-766-2 (pdf).
- 23 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. (2010) RT-kortti 14-10984. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS. 16 s.
- 24 Rakenteiden kosteusmittauspaketti Vaisala SHM40 käyttöohje. (2015) Helsinki Vaisala Oyj. 64 s. Käyty 15.1.2016. <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/SHM40%20Suomenkielinen%20k%C3%A4ytt%C3%B6ohje.pdf>
- 25 Työmaan laatuasiakirjan aineistoa, Sweco Asiantuntijapalvelut Oy, Senaatti-kiinteistöt.
- 26 SFS-EN 1504-2 Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät, määritelmät, vaatimukset, laadunvalvonta ja vaatimuksenmukaisuuden arviointi. Osa 2: Betonipinnan suojaus. (2005) Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.

- 27 Työmaan laatuasiakirjan aineistoa, A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy, Senaatti-kiinteistöt
- 28 Työmaan laatuasiakirjan aineistoa, SRV Rakennus Oy, Senaatti-kiinteistöt

Liiteluettelo

- Liite 1. Betonirakenteiden kosteusmittaus- ja kuivumisen arviointi –julkaisun mukaan laadittu esimerkkilaskelma. 1 sivu.
- Liite 2. Drying of Construction Water in Concrete –julkaisun mukaan laadittu esimerkkilaskelma. 1 sivu.
- Liite 3. Kuivumisaika-arviot kahdelle rakenteelle olosuhteiden muuttuessa. 4 sivua.
- Liite 4. Kappaleessa 6.2 esitetyn sisäilman esimerkkilaskelman kulku. 1 sivu.
- Liite 5. Kappaleessa 8.3 esitetty kellaritilan kuivumisolosuhteiden tarkastelun kulku koko tilalle sekä pienemmälle osastolle. 2 sivua.

LIITE 1. Betonirakenteiden kosteusmittaus- ja kuivumisen arviointi –julkaisun mukaan laadittu esimerkkilaskelma

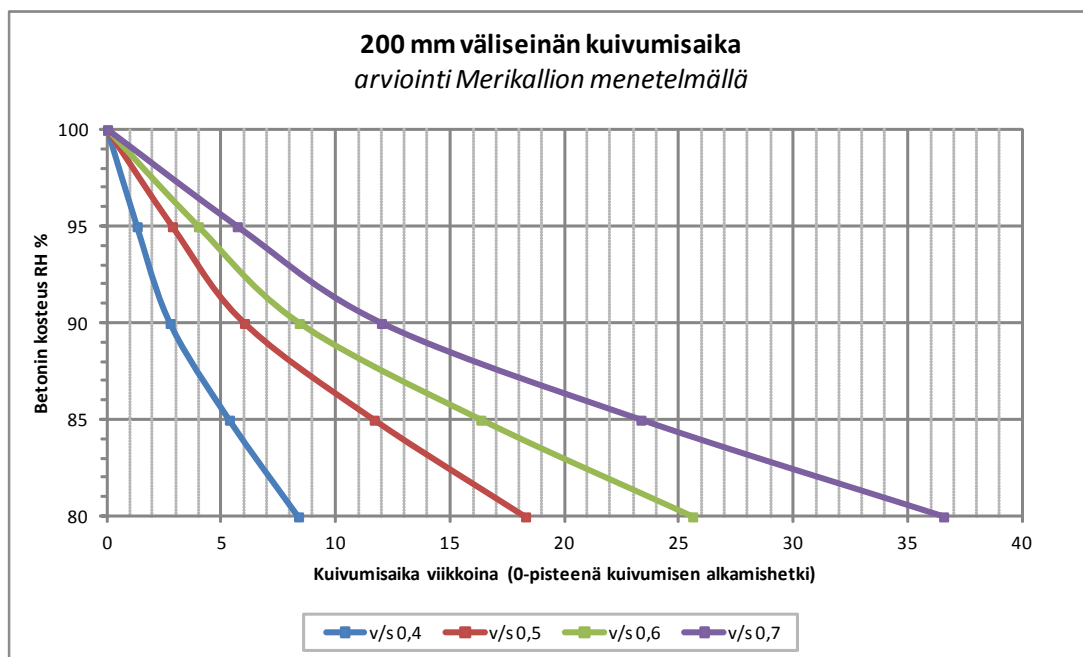
Vesi/sideaine-suhteen vaikutus kuivumisaikaan

Laskelma suoritettu Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi -julkaisun mukaan

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrästä kuivumisajat RH-arvoihin 95, 90, 85 ja 80 %
- rakennepaksuus 200 mm
- kahteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen kosteassa yli 2 viikkoa
- kuivumisolosuhteet 18°C / RH 50 %

v/s	tavoite-kosteus (betoni)	perus-kuivumis-aika	X	vesi / sideaine-suhde	X	Kuivumis-suunta	X	Raken-teen paksuus	X	Kastumis-aika	X	Kuivumis-olo-suhteet	=	Arvioitu kuivumis-aika
0,4	95	9	x	0,2	x	1,0	x	0,8	x	1,0	x	0,9	=	1
	90	19	x	0,2	x	1,0	x	0,8	x	1,0	x	0,9	=	3
	85	37	x	0,2	x	1,0	x	0,8	x	1,0	x	0,9	=	5
	80	58	x	0,2	x	1,0	x	0,8	x	1,0	x	0,9	=	8
0,5	95	9	x	0,5	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	3
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	6
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	12
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	18
0,6	95	9	x	0,7	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	4
	90	19	x	0,7	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	8
	85	37	x	0,7	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	16
	80	58	x	0,7	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	26
0,7	95	9	x	1	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	6
	90	19	x	1	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	12
	85	37	x	1	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	23
	80	58	x	1	x	1,0	x	0,7	x	1,0	x	0,9	=	37



LIITE 2. Drying of Construction Water in Concrete - julkaisun mukaan laadittu esimerkkilaskelma

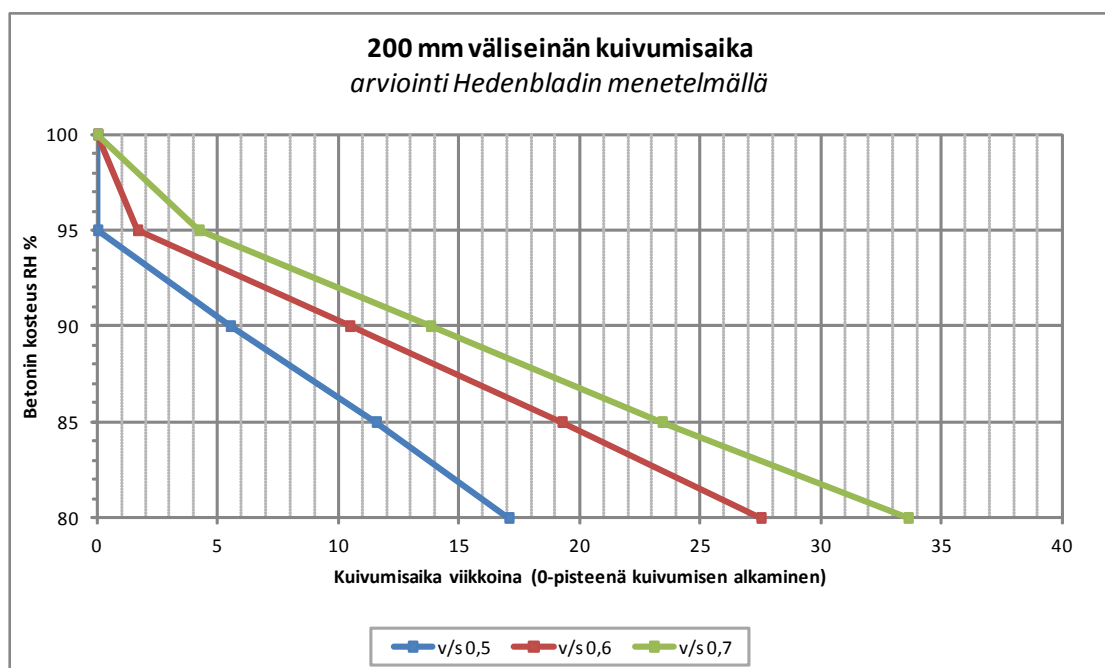
Vesi/sideaine-suhteen vaikutus kuivumisaikaan

Laskelma suoritettu Drying of Construction Water in Concrete -julkaisun mukaan

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrä 180 mm rakenteelle
- tarkasteltu rakennepaksuus 200 mm
- kahteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen
- kastuneena yli 2 viikkoa
- kuivumisolosuhteet 18°C / RH 60 %

v/s	tavoite- kosteus (betoni)	perus- kuivumis- aika	X	Raken- teen paksuus	=	Arvioitu kuivumis- aika
0,5	95	0	x	1,1	=	0
	90	5	x	1,1	=	6
	85	10,5	x	1,1	=	12
	80	15,5	x	1,1	=	17
0,6	95	1,5	x	1,1	=	2
	90	9,5	x	1,1	=	10
	85	17,5	x	1,1	=	19
	80	25	x	1,1	=	28
0,7	95	3,5	x	1,2	=	4
	90	11,5	x	1,2	=	14
	85	19,5	x	1,2	=	23
	80	28	x	1,2	=	34



LIITE 3. Kuivumisaika-arviot kahdelle rakenteelle olo-suhteiden muuttuessa

Tarkastelu: kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisaikaan

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrästä kuivumisajat RH-arvoihin 95, 90, 85 ja 80 %
- vesi/sideaine-suhde 0,5, rakennepaksuus 300 mm
- kahteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen kosteassa yli 2 viikkoa

raken- teen paksuus	tavoite- kosteus (betoni)	perus- kuivumis- aika	X	vesi / sideaine- suhde	X	Kuivumis- suunta	X	Raken- teen paksuus	X	Kastumis- aika	X	Kuivumis- olo- suhteet	=	Arvioitu kuivumis- aika
10 °C RH 35 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	7
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	15
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	29
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	45
10 °C RH 50 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	7
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	15
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	29
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	45
10 °C RH 60 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	8
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	16
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	31
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	49
10 °C RH 70 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	8
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	17
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	34
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	53
10 °C RH 80 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	10
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	21
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	41
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	64
18 °C RH 35 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	5
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	10
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	19
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	30
18 °C RH 50 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	5
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	11
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	22
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	34
18 °C RH 60 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	6
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	12
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	24
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	38
18 °C RH 70 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	6
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	14
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	26
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	41
18 °C RH 80 %	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	7
	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	15
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	29
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	45

25 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	4
RH 35 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	17
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	26
25 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	4
RH 50 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	17
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	26
25 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	5
RH 60 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	10
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	19
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	30
25 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	5
RH 70 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	10
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	19
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	30
25 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	6
RH 80 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	12
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	24
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	38
30 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	4
RH 35 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	7
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	14
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	23
30 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	4
RH 50 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	7
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	14
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	23
30 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	4
RH 60 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	17
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	26
30 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	4
RH 70 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	17
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	26
30 °C	95	9	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	5
RH 80 %	90	19	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	11
	85	37	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	22
	80	58	x	0,5	x	1,0	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	34

Tarkastelu: kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisaikaan

Tarkastelussa lähtötiedot:

- peruskuivumiskäyrästä kuivumisajat RH-arvoihin 95, 90, 85 ja 80 %
- vesi/sideaine-suhde 0,5, rakennepaksuus 300 mm
- yhteen suuntaan kuivuva, betonoinnin jälkeen kosteassa yli 2 viikkoa

raken- teen paksuus	tavoite- kosteus (betoni)	perus- kuivumis- aika	X	vesi / sideaine- suhde	X	Kuivumis- suunta	X	Raken- teen paksuus	X	Kastumis- aika	X	Kuivumis- olo- suhteet	=	Arvioitu kuivumis- aika
10 °C RH 35 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	16
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	34
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	66
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	104
10 °C RH 50 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	16
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	34
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	66
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	104
10 °C RH 60 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	17
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	37
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	72
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,3	=	113
10 °C RH 70 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	19
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	40
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	77
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,4	=	121
10 °C RH 80 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	23
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	48
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	94
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,7	=	147
18 °C RH 35 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	11
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	23
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	44
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	69
18 °C RH 50 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	12
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	26
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	50
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	78
18 °C RH 60 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	13
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	28
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	55
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	87
18 °C RH 70 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	15
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	31
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	61
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,1	=	95
18 °C RH 80 %	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	16
	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	34
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	66
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,2	=	104

25 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
RH 35 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	20
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	39
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	61
25 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
RH 50 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	20
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	39
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	61
25 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	11
RH 60 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	23
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	44
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	69
25 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	11
RH 70 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	23
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	44
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,8	=	69
25 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	13
RH 80 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	28
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	55
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	1,0	=	87
30 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	8
RH 35 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	17
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	33
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	52
30 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	8
RH 50 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	17
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	33
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,6	=	52
30 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
RH 60 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	20
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	39
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	61
30 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	9
RH 70 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	20
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	39
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,7	=	61
30 °C	95	9	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	12
RH 80 %	90	19	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	26
	85	37	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	50
	80	58	x	0,5	x	2,3	x	1,3	x	1,0	x	0,9	=	78

LIITE 4. Kappaleessa 6.2 esitetyn sisäilman esimerkki-laskelman kulku

T = 10 °C, RH = 50 %					T = 15 °C, RH = 50 %					T = 20 °C, RH = 50 %					T = 25 °C, RH = 50 %				
lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³		
Tammikuu	9,45	4,73	1,83	12,86	6,43	3,53	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	8,60	
Helmi	9,45	4,73	2,05	12,86	6,43	3,75	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	8,82	
Maaliskuu	9,45	4,73	1,31	12,86	6,43	3,01	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	8,08	
Huhtikuu	9,45	4,73	0,22	12,86	6,43	1,92	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	6,99	
Toukokuu	9,45	4,73	-1,48	12,86	6,43	0,23	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	5,30	
Kesäkuu	9,45	4,73	-3,81	12,86	6,43	-2,10	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	2,97	
Heinäkuu	9,45	4,73	-5,85	12,86	6,43	-4,14	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	0,93	
Elokuu	9,45	4,73	-5,66	12,86	6,43	-3,96	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	1,11	
Syyskuu	9,45	4,73	-3,38	12,86	6,43	-1,67	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	3,40	
Lokakuu	9,45	4,73	2,02	12,86	6,43	3,73	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	8,80	
Marraskuu	9,45	4,73	0,33	12,86	6,43	2,04	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	7,11	
Joulukuu	9,45	4,73	1,32	12,86	6,43	3,02	17,28	8,64	17,28	17,28	8,64	17,28	23,00	11,50	23,00	23,00	11,50	8,09	

T = 10 °C, RH = 30 %					T = 15 °C, RH = 30 %					T = 20 °C, RH = 30 %					T = 25 °C, RH = 30 %				
lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³		
Tammikuu	9,45	2,84	-0,06	12,86	3,86	0,96	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	17,28	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	4,00	
Helmi	9,45	2,84	0,16	12,86	3,86	1,18	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	17,28	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	4,22	
Maaliskuu	9,45	2,84	-0,58	12,86	3,86	0,44	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	1,77	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	3,48	
Huhtikuu	9,45	2,84	-1,67	12,86	3,86	-0,65	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	0,68	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	2,39	
Toukokuu	9,45	2,84	-3,37	12,86	3,86	-2,34	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	-1,02	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	0,70	
Kesäkuu	9,45	2,84	-5,70	12,86	3,86	-4,68	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	-3,35	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	-1,63	
Heinäkuu	9,45	2,84	-7,74	12,86	3,86	-6,71	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	-5,39	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	-3,67	
Elokuu	9,45	2,84	-7,55	12,86	3,86	-6,53	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	-5,20	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	-3,49	
Syyskuu	9,45	2,84	-5,27	12,86	3,86	-4,24	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	-2,92	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	-1,20	
Lokakuu	9,45	2,84	0,13	12,86	3,86	1,16	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	2,48	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	4,20	
Marraskuu	9,45	2,84	-1,56	12,86	3,86	-0,53	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	0,79	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	2,51	
Joulukuu	9,45	2,84	-0,57	12,86	3,86	0,45	17,28	5,18	17,28	17,28	5,18	1,78	23,00	6,90	23,00	23,00	6,90	3,49	

T = 10 °C, RH = 70 %					T = 15 °C, RH = 70 %					T = 20 °C, RH = 70 %					T = 25 °C, RH = 70 %				
lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³	lämpötilan mukainen kylästymiskosteus s, g/m³	ilman veshöyrysisältö, g/m³	sisäilmaan mahtuva kosteus määrä, g/m³		
Tammikuu	9,45	6,62	3,72	12,86	9,00	6,10	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	9,20	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	13,20	
Helmi	9,45	6,62	3,94	12,86	9,00	6,32	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	9,42	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	13,42	
Maaliskuu	9,45	6,62	3,20	12,86	9,00	5,58	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	8,68	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	12,68	
Huhtikuu	9,45	6,62	2,11	12,86	9,00	4,49	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	7,59	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	11,59	
Toukokuu	9,45	6,62	0,41	12,86	9,00	2,80	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	5,89	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	9,90	
Kesäkuu	9,45	6,62	-1,92	12,86	9,00	0,47	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	3,56	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	7,57	
Heinäkuu	9,45	6,62	-3,96	12,86	9,00	-1,57	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	1,53	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	5,53	
Elokuu	9,45	6,62	-3,77	12,86	9,00	-1,39	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	1,71	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	5,71	
Syyskuu	9,45	6,62	-1,49	12,86	9,00	0,90	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	3,99	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	8,00	
Lokakuu	9,45	6,62	3,91	12,86	9,00	6,30	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	9,39	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	13,40	
Marraskuu	9,45	6,62	2,22	12,86	9,00	4,61	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	7,70	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	11,71	
Joulukuu	9,45	6,62	3,21	12,86	9,00	5,59	17,28	12,10	17,28	17,28	12,10	8,69	23,00	16,10	23,00	23,00	16,10	12,69	

LIITE 5. Kappaleessa 8.3 esitetty kellaritilan kuivumisolosuhteiden tarkastelun kulku koko tilalle sekä pienemmälle osastolle

Lähtötiedot				
ilman ominaisuudet	kosteudenerotusteho, l/vrk	l/h	g/h	
30 °C / RH 80 %	69,6	2,9	2900	
20 °C / RH 70 %	39,2	1,6	1600	
10 °C / RH 60 %	10,8	0,45	450	
Käytettävä kuivainvaihtoehto			1600 g/h	

IV alkuvaihe							
1/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
2,5	2975	0,83	17085,13	-4368,13	-3,0	-2,7	
2,5	2975	0,83	17738,44	-5021,44	-3,0	-3,1	
2,5	2975	0,83	15534,86	-2817,86	-2,0	-1,8	
2,5	2975	0,83	12292,70	424,30	0,0	0,3	
3,5	4165	1,16	10155,94	2561,06	2,0	1,6	
3,5	4165	1,16	441,49	12275,51	8,0	7,7	
0,5	595	0,17	-1148,35	13865,35	9,0	8,7	
0,5	595	0,17	-1039,64	13756,64	9,0	8,6	
3,5	4165	1,16	2242,44	10474,56	7,0	6,5	
2,5	2975	0,83	17662,58	-4945,58	-3,0	-3,1	
2,5	2975	0,83	12640,18	76,82	0,0	0,0	
2,5	2975	0,83	15563,12	-2846,12	-2,0	-1,8	

IV keskivaihe							
1/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
2,5	2975	0,83	17085,13	-8607,13	-5,0	-5,4	
2,5	2975	0,83	17738,44	-9260,44	-6,0	-5,8	
2,5	2975	0,83	15534,86	-7056,86	-4,0	-4,4	
2,5	2975	0,83	12292,70	-3814,70	-2,0	-2,4	
3,5	4165	1,16	10155,94	-1677,94	-1,0	-1,0	
0,5	595	0,17	63,07	8414,93	5,0	5,3	
0,5	595	0,17	-1148,35	9626,35	6,0	6,0	
0,5	595	0,17	-1039,64	9517,64	6,0	5,9	
0,5	595	0,17	320,35	8157,65	5,0	5,1	
2,5	2975	0,83	17662,58	-9184,58	-6,0	-5,7	
2,5	2975	0,83	12640,18	-4162,18	-3,0	-2,6	
2,5	2975	0,83	15563,12	-7085,12	-4,0	-4,4	

IV loppuvaihe							
1/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
2,5	2975	0,83	17085,13	-12846,13	-8,0	-8,0	
2,5	2975	0,83	17738,44	-13499,44	-8,0	-8,4	
2,5	2975	0,83	15534,86	-11295,86	-7,0	-7,1	
2,5	2975	0,83	12292,70	-8053,70	-5,0	-5,0	
3,5	4165	1,16	10155,94	-5916,94	-4,0	-3,7	
0,5	595	0,17	63,07	4175,93	3,0	2,6	
0,5	595	0,17	-1148,35	5387,35	3,0	3,4	
0,5	595	0,17	-1039,64	5278,64	3,0	3,3	
0,5	595	0,17	320,35	3918,65	2,0	2,4	
2,5	2975	0,83	17662,58	-13423,58	-8,0	-8,4	
2,5	2975	0,83	12640,18	-8401,18	-5,0	-5,3	
2,5	2975	0,83	15563,12	-11324,12	-7,0	-7,1	

Lähtötiedot				
ilman ominaisuudet	kosteudenerotusteho, l/vrk	l/h	g/h	
30 °C / RH 80 %	69,6	2,9	2900	
20 °C / RH 70 %	39,2	1,6	1600	
10 °C / RH 60 %	10,8	0,45	450	
	Käytettävä kuivainvaihtoehto		1600 g/h	

IV alkuvaihe							
l/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
1,5	903	0,25	5185,84	655,16	0,0	0,4	
1,5	903	0,25	5384,14	456,86	0,0	0,3	
1,7	1023,4	0,28	5343,99	497,01	0,0	0,3	
2,5	1505	0,42	6218,66	-377,66	0,0	-0,2	
2,5	1505	0,42	3669,79	2171,21	1,0	1,4	
0,5	301	0,08	31,91	5809,09	4,0	3,6	
0,5	301	0,08	-580,93	6421,93	4,0	4,0	
0,5	301	0,08	-525,94	6366,94	4,0	4,0	
0,5	301	0,08	162,06	5678,94	4,0	3,5	
1,5	903	0,25	5361,11	479,89	0,0	0,3	
2	1204	0,33	5115,56	725,44	0,0	0,5	
2	1204	0,33	6298,49	-457,49	0,0	-0,3	

IV keskivaihe							
l/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
1,2	722,4	0,20	4148,67	-254,67	0,0	-0,2	
1,2	722,4	0,20	4307,31	-413,31	0,0	-0,3	
1,2	722,4	0,20	3772,23	121,77	0,0	0,1	
1,5	903	0,25	3731,20	162,80	0,0	0,1	
2,5	1505	0,42	3669,79	224,21	0,0	0,1	
0,5	301	0,08	31,91	3862,09	2,0	2,4	
0,5	301	0,08	-580,93	4474,93	3,0	2,8	
0,5	301	0,08	-525,94	4419,94	3,0	2,8	
0,5	301	0,08	162,06	3731,94	2,0	2,3	
1,2	722,4	0,20	4288,89	-394,89	0,0	-0,2	
1,5	903	0,25	3836,67	57,33	0,0	0,0	
1,2	722,4	0,20	3779,09	114,91	0,0	0,1	

IV loppuvaihe							
l/h	m ³ /h	m ³ /s	g/h	g/h	kuivaimia kpl		
1	602	0,17	3457,23	-1510,23	-1,0	-0,9	
1	602	0,17	3589,43	-1642,43	-1,0	-1,0	
1	602	0,17	3143,52	-1196,52	-1,0	-0,7	
1	602	0,17	2487,46	-540,46	0,0	-0,3	
1	602	0,17	1467,92	479,08	0,0	0,3	
0,5	301	0,08	31,91	1915,09	1,0	1,2	
0,5	301	0,08	-580,93	2527,93	2,0	1,6	
0,5	301	0,08	-525,94	2472,94	2,0	1,5	
0,5	301	0,08	162,06	1784,94	1,0	1,1	
1	602	0,17	3574,07	-1627,07	-1,0	-1,0	
1	602	0,17	2557,78	-610,78	0,0	-0,4	
1	602	0,17	3149,24	-1202,24	-1,0	-0,8	